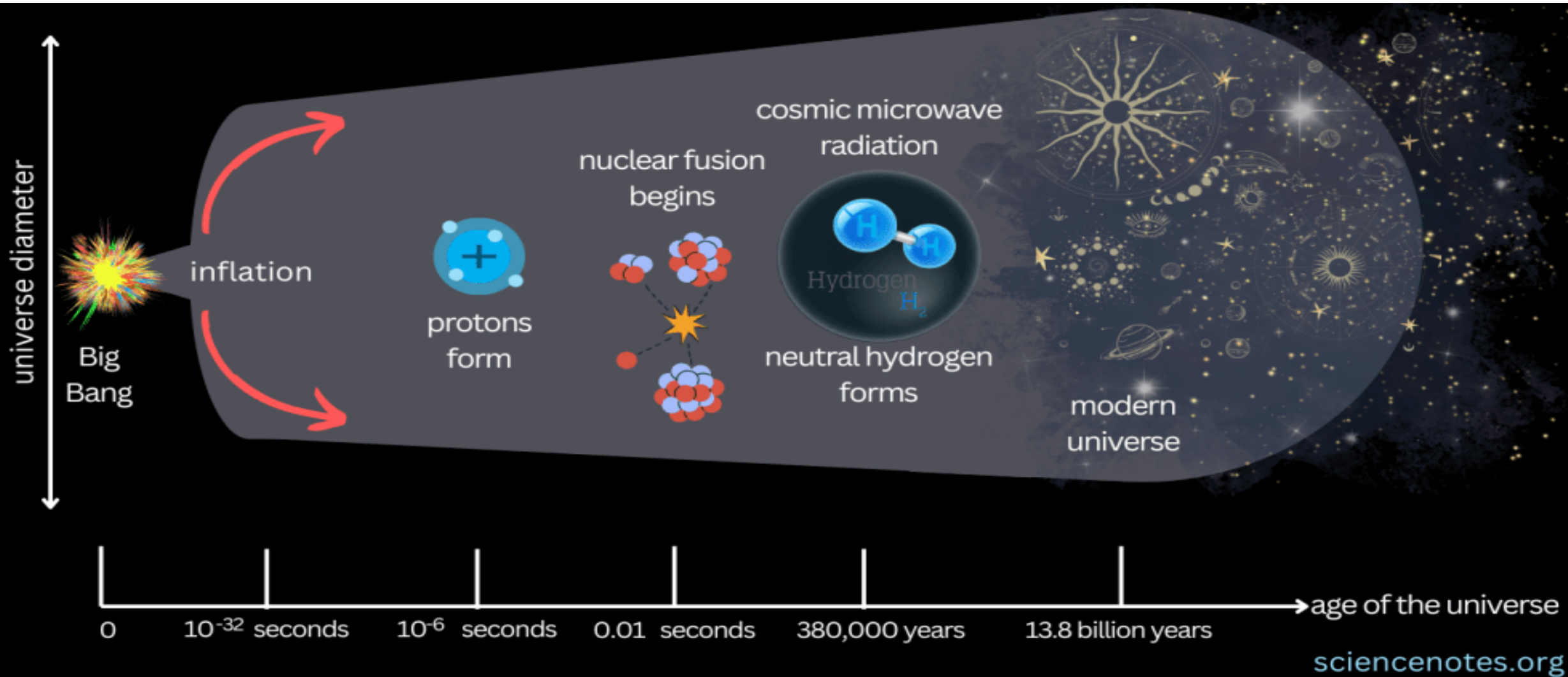
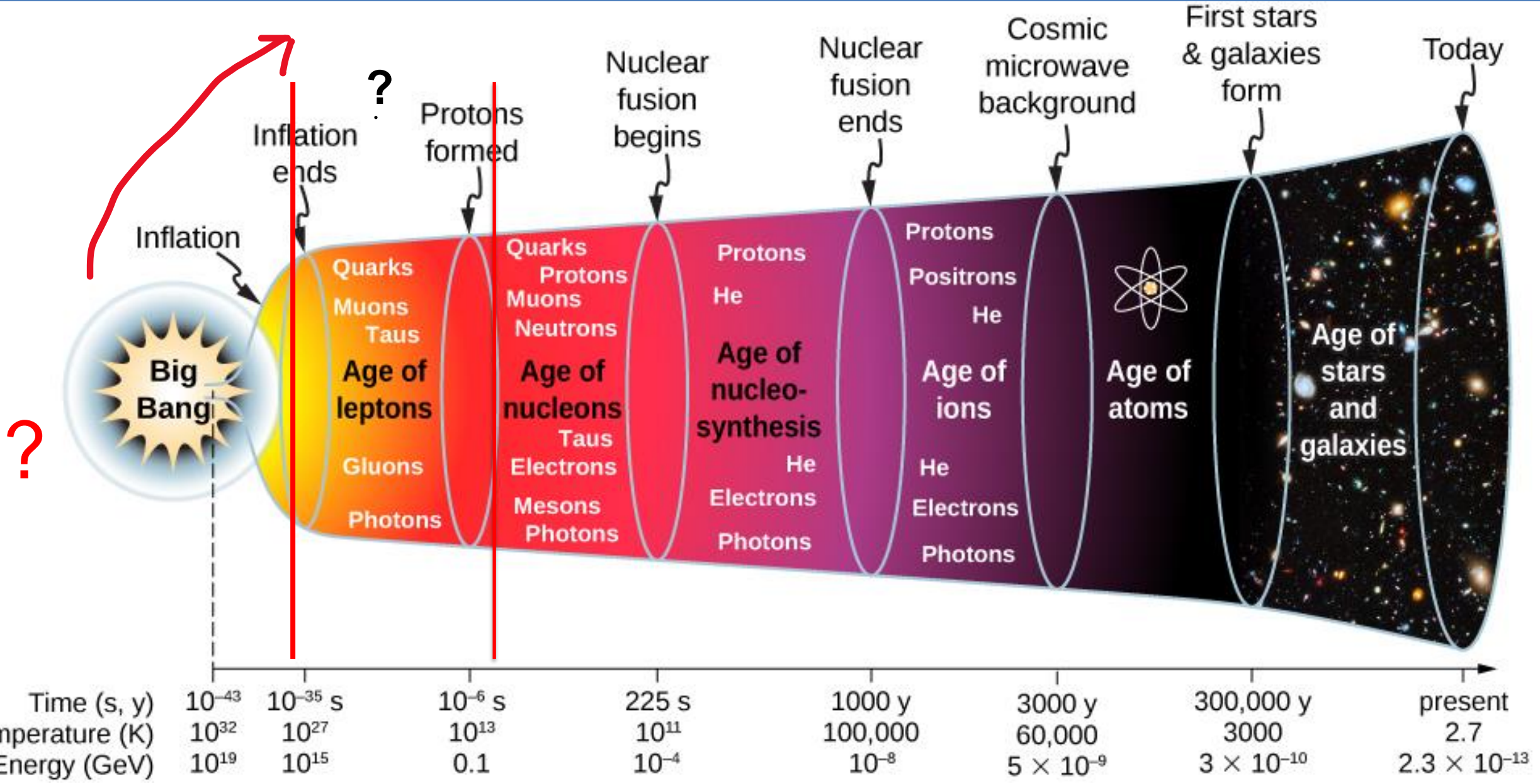


Uvod u kozmologiju

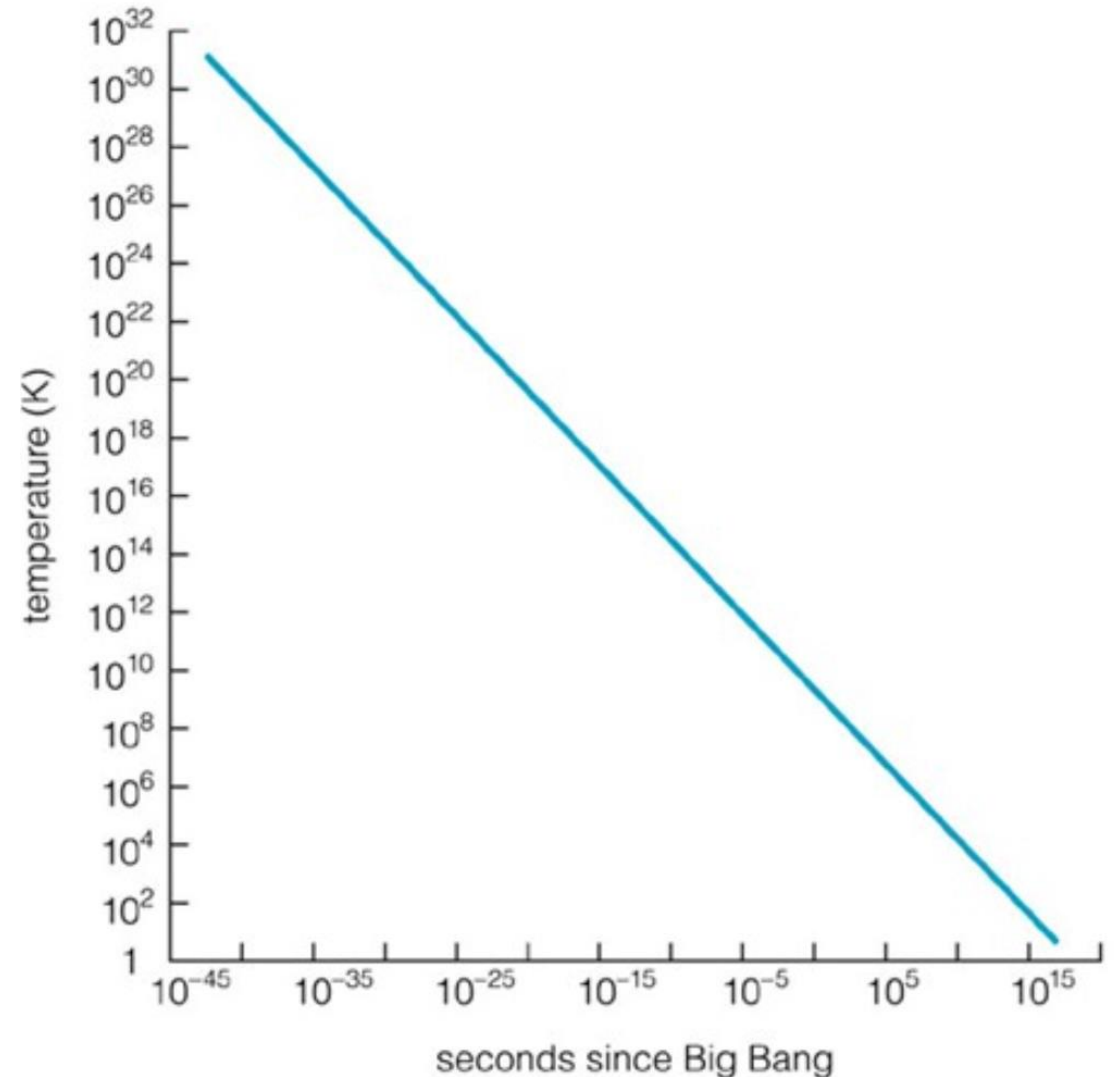


Big Bang - evolucija svemir

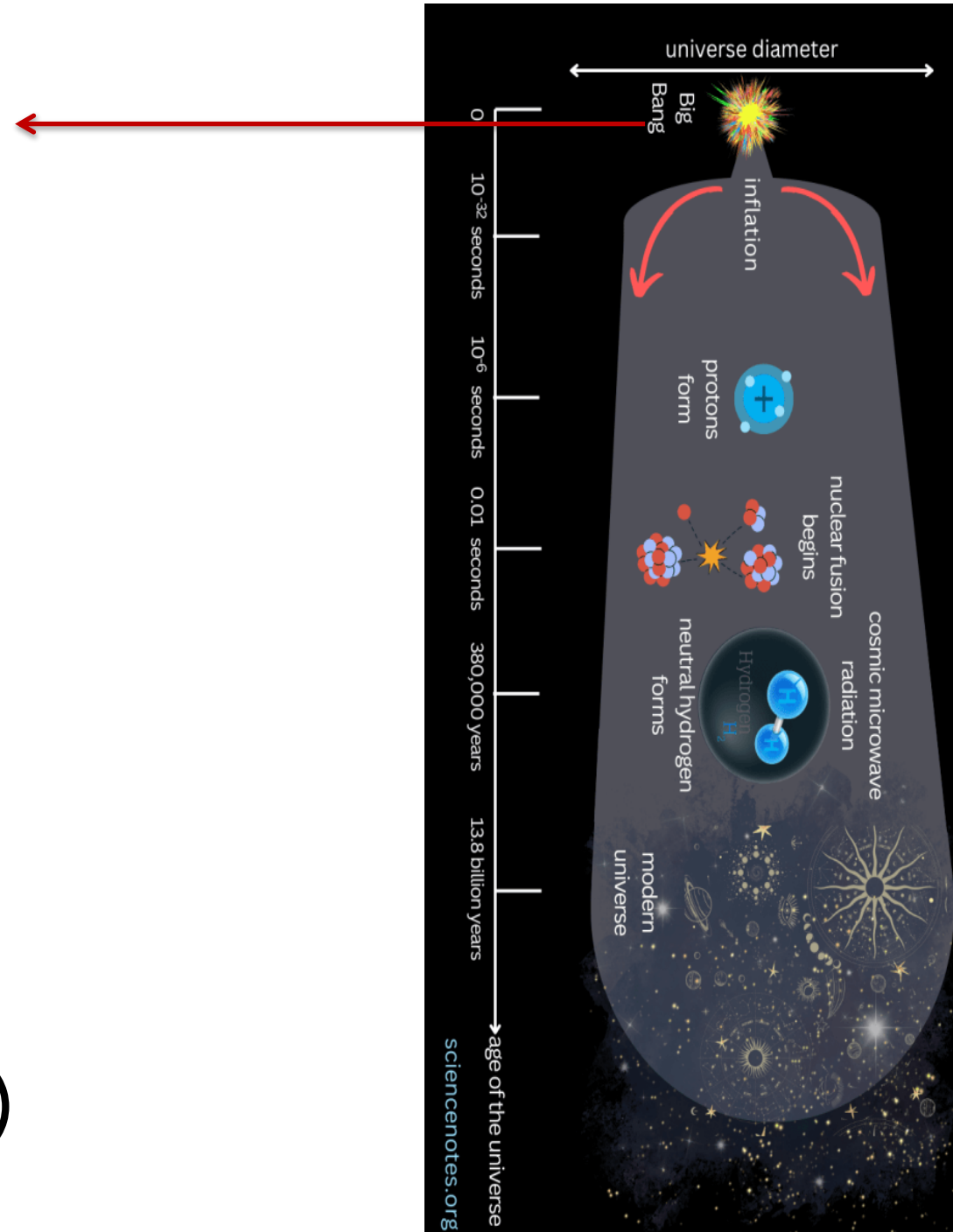


Temperatura & fizikalni procesi

- Rani svemir je bio ekstremno vruć i gust
- Toliko vruć da na početku nije bilo značajne razlike između materije (elementarnih čestica) i energije (fotona)
- Odvija se transformacija fotona u čestice i obratno
- Temperatura opada kako se svemir širi.
- Čestice izlaze iz termodinamičke ravnoteže $kT_i < m_i c^2$

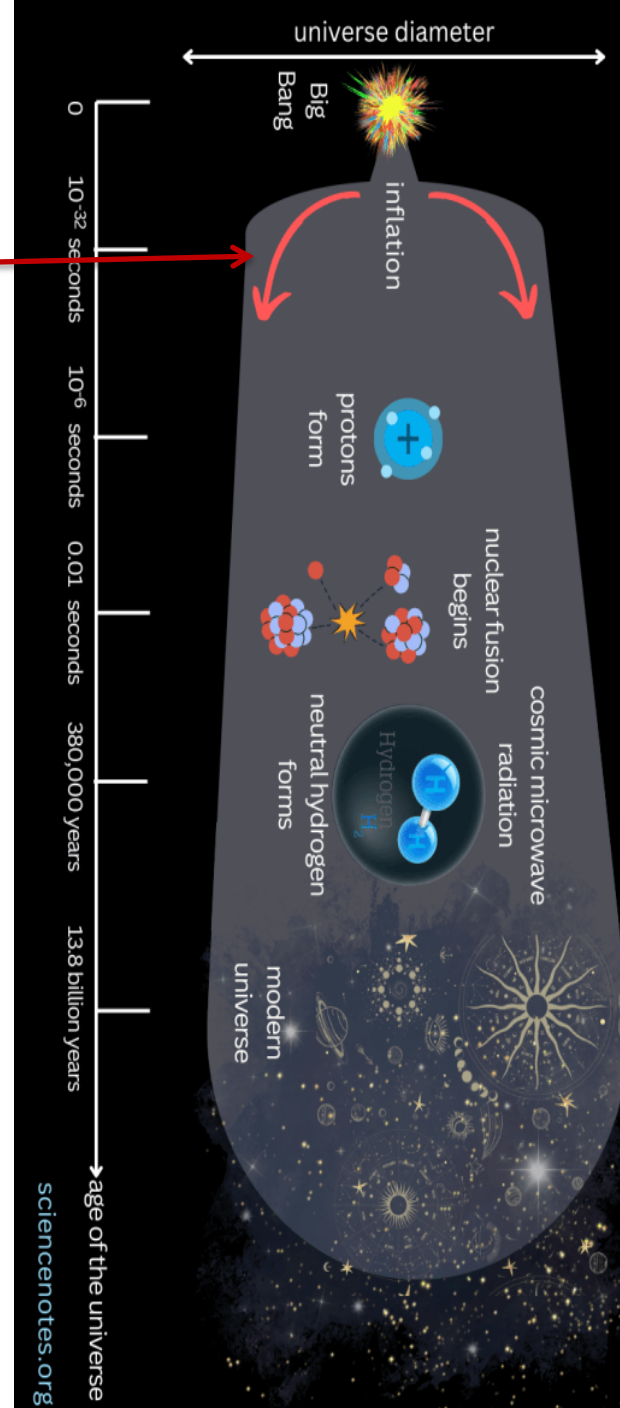
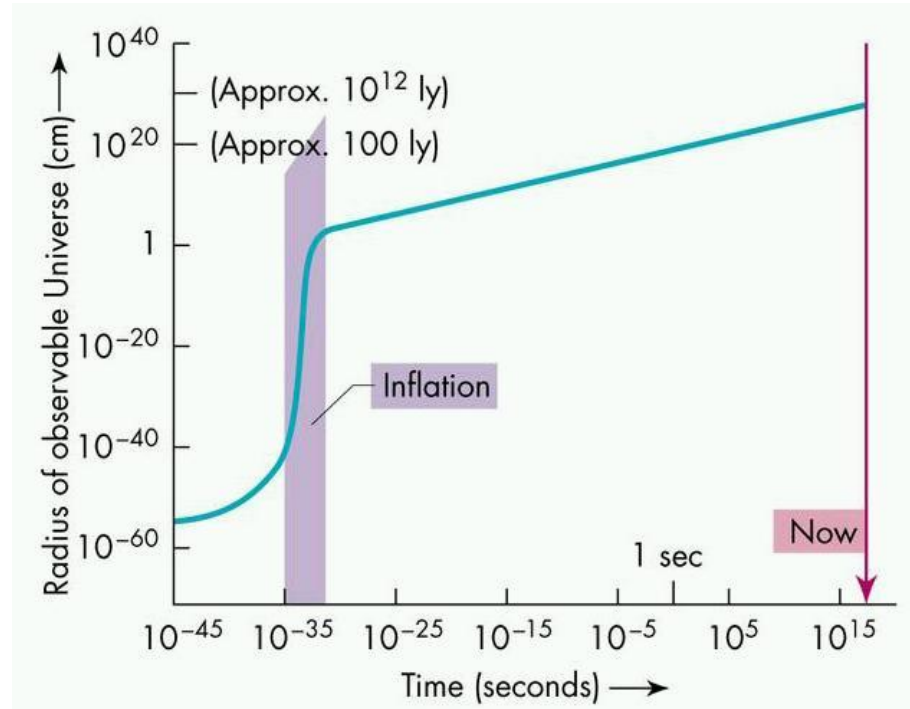


- Singularitet
- Dogodio se svugdje
- Nemamo valjanu fizikalnu teoriju
- Trenutno nedostupan kozmološkim opažanjima
- Molim vas ne pitajte što je bilo prije Big Banga 😊



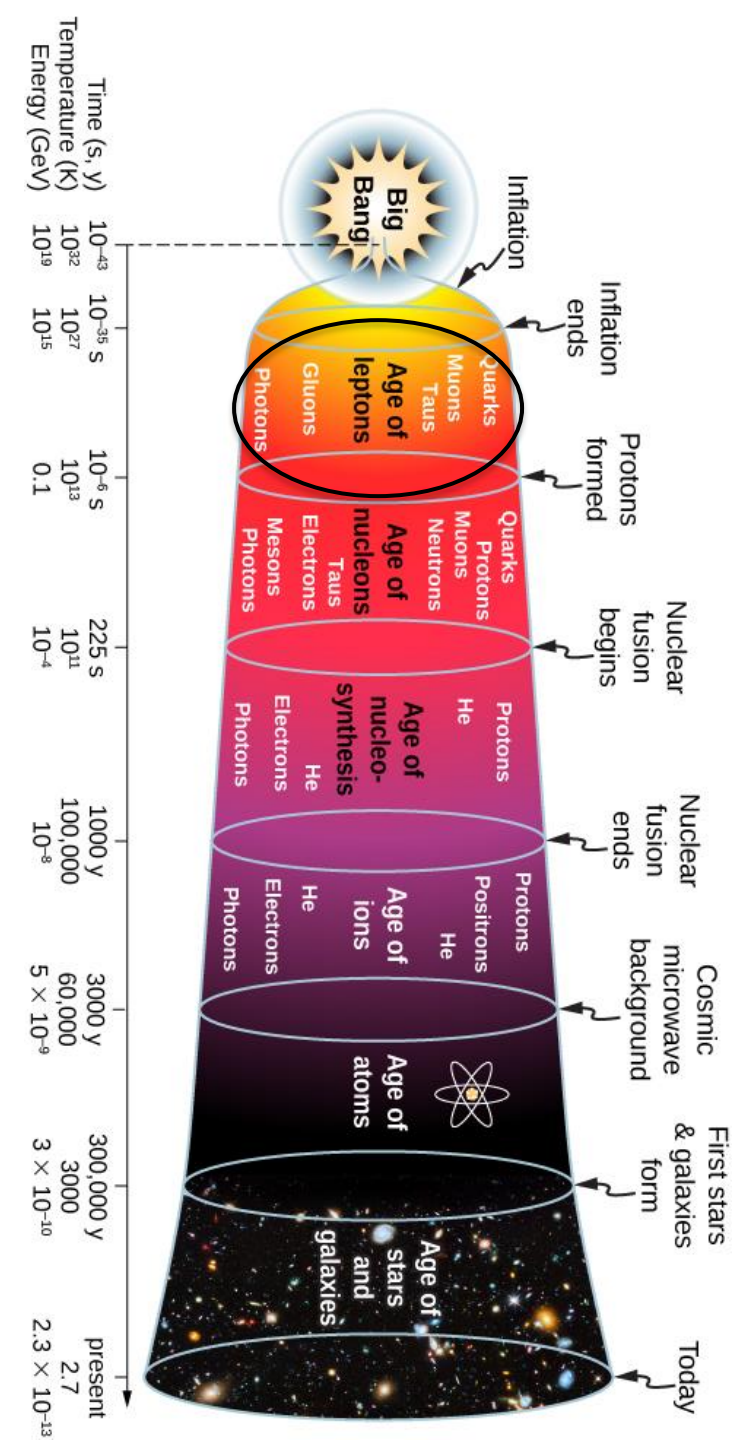
INFLACIJA

- Eksponencijalno širenje
- Egzotična fizika
- Energija sadržana u samom prostor-vremenu
- Kako se širi oslobađa se energija
- Kratkotrajna inflacija - naglo se zaustavlja ?
- Prvi put nastaju elementarne čestice
- Gravitacija se odvaja
- Nakon inflacije: Big Bang – počinje širenje svemira koja izgleda znamo opisati
- Kvante fluktuacije – proširene tijekom inflacije na makroskopsku skalu



Dominira fizika elementarnih čestica

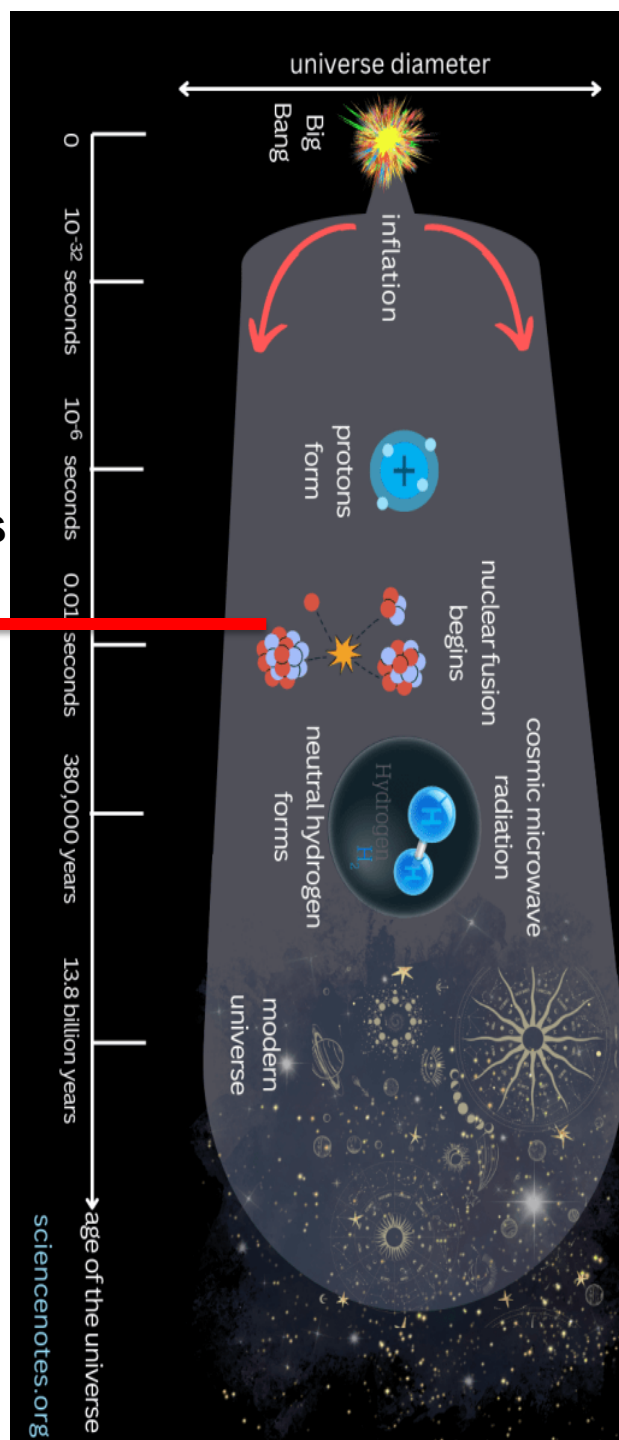
- Kvark gluon plazma (ALICE ekperiment na LHC)
- Kako se širi hladi se, formiraju se barioni, protoni i nukleoni
- Odvija se bariogeneza: barioni i antibarioni se anihiliraju ali zbog male neravnoteže preživi 1 barion na milijardu barion-antibariona
- Leptogeneza – slično, nakon anihilacije leptona i antileptona, ostane 1 lepton na milijardu lepton-antilepton



Nukleosinteza ~ 3 minute (1 s – 20 min)

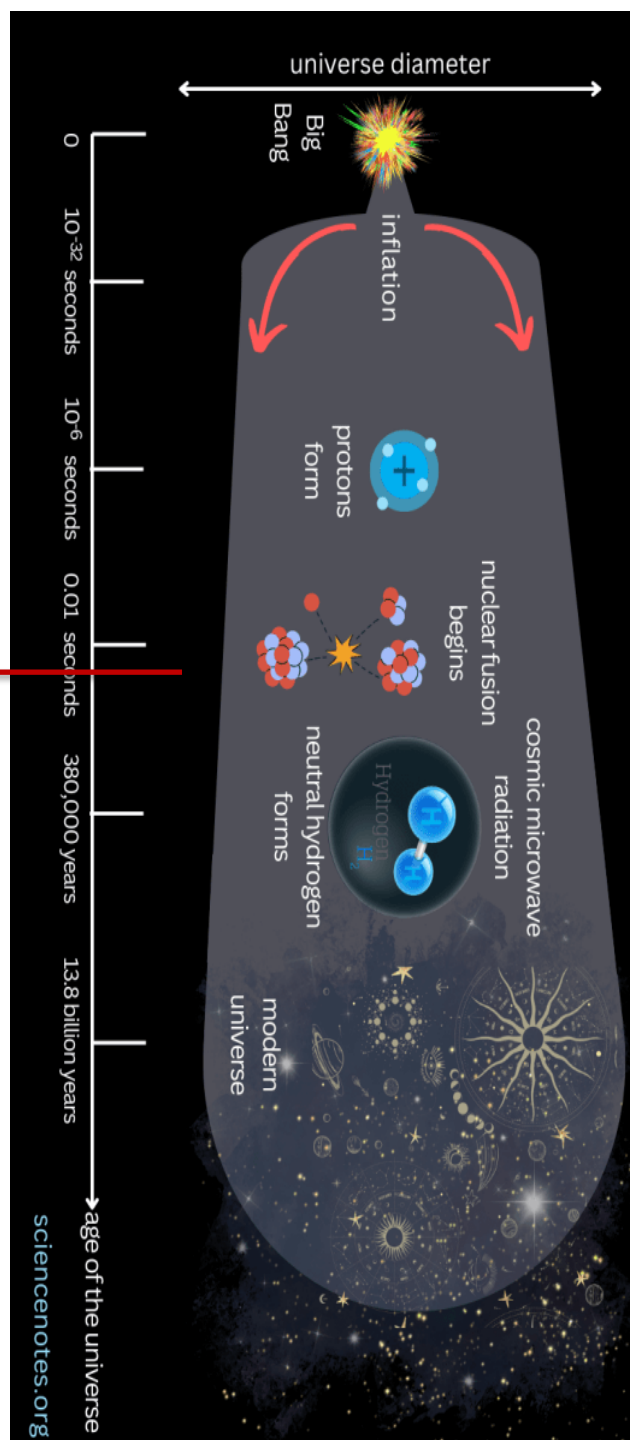
- Svemir čine protoni, neutroni, elektroni, foton
- 10^{10} fotona na 1 proton ($\eta = 6 \times 10^{10}$ – omjer gustoće broja barion prema fotonima).
- η – bitan za procjenu brzine odvijanje nuklearnih reakcija u kojim nastaju lake jezgre i predviđanje koliki je udio, protona, deuterija, ^3He , ^4He , ^7Li
- **Previđanja u izvrsnom slaganjima s opažanjima**
- Po završetku nukleosinteze svemir je u stannju plazme (elektroni + jezgre + fotoni)
- Svemir ne neproziran, sve do 380 000 godina

Ovo je za nas
Big Bnag



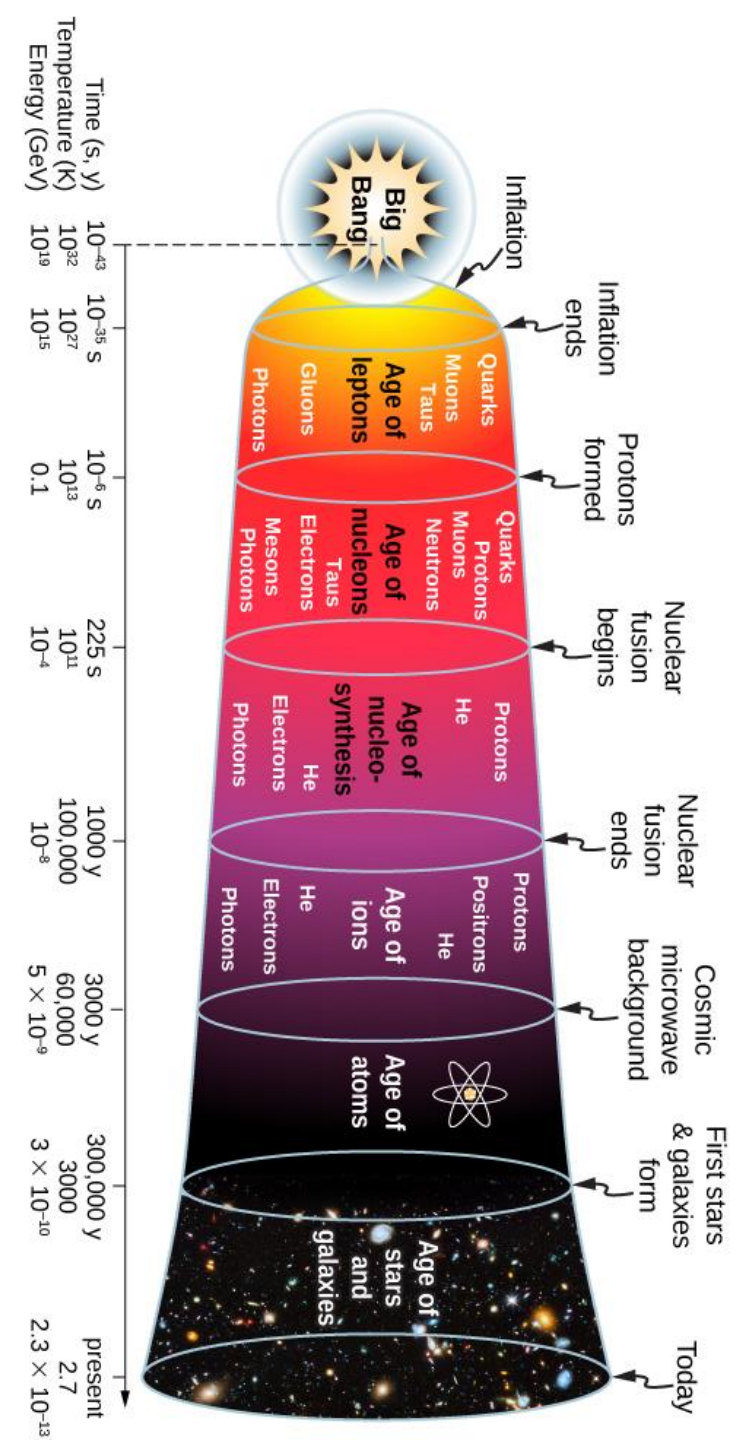
Rekombinacija

- Svemir čine protoni, neutroni, elektroni, foton
- 10^9 fotona na 1 proton ($\eta = 6 \times 10^{10}$ – omjer gustoće broja barion prema fotonima).
- η – bitan za procijenu brzine odvijanje nuklearnih reakcija u kojim nastaju lake jezgre i predviđanje koliki je udio, protona, deuterija, ^3He , ^4He , ^7Li
- **Previđanja u izvrsnom slaganjima s opažanjima**
- Po završetku nukleosinteze svemir je u stannju plazme (elektroni + jezgre + fotoni)
- Svemir ne neproziran, sve do 380 000 godina



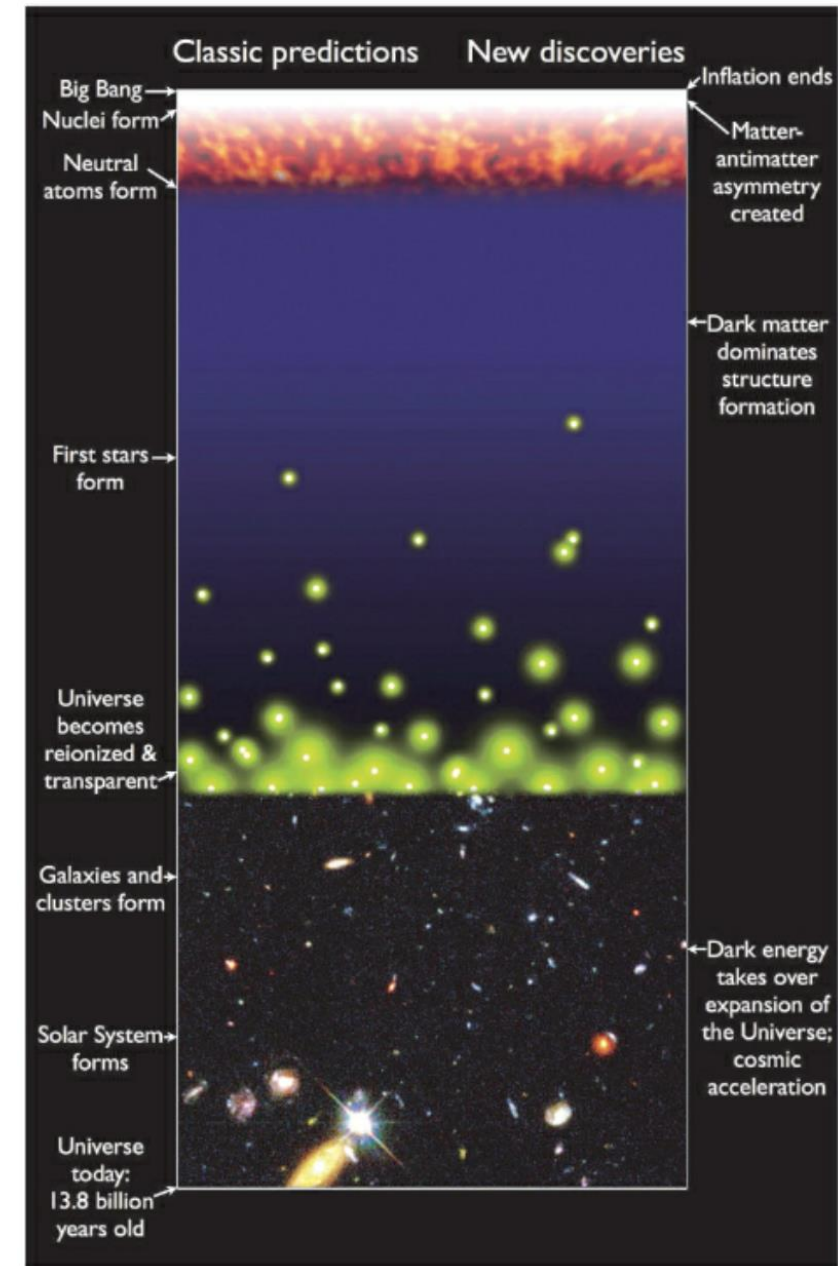
Doba tame: 380 000 – (0.5 -1) 10⁹ godina

- Svemir čine atomi, vodika, helija i fotoni koji se slobodno propagiraju (doba tame, jer nema zvijezda)
- Male neuniformnosti u gustoći atoma pod utjecaje gravitacije formiraju prve zvijezde i galaksije – završetak doba tame
- Intenzivno zračenje prvih zvijezda ionizira atome vodika i helija (reionizacija)
- Početak formiranja velikim kozmičkih struktura koje danas opažamo

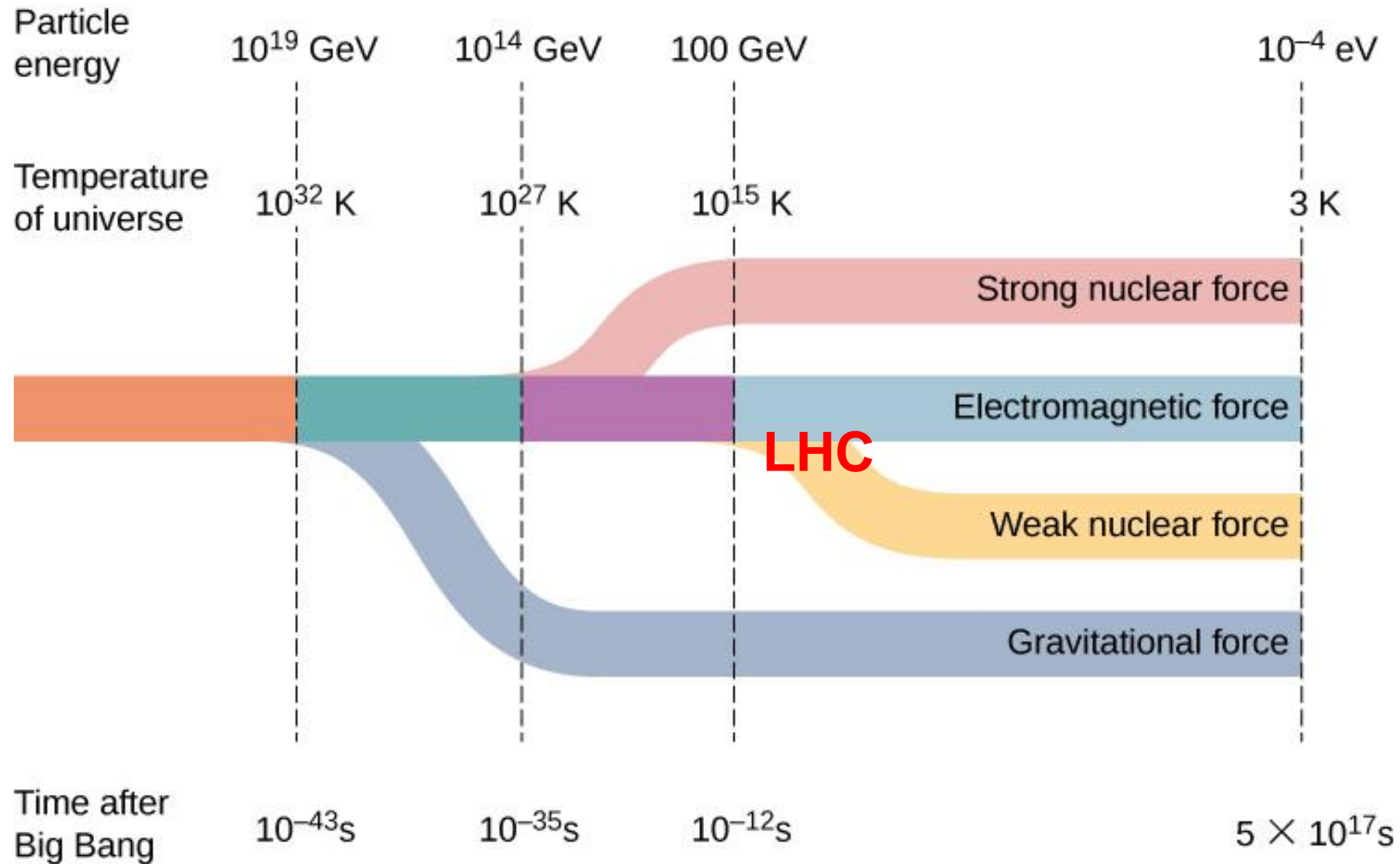


Što je Big Bang

- Big Bang počinje nakon završetka inflacije
- Prije inflacije $t < 10^{-30}$ s (?)
- Opažanja koja potvrđuju Big Bang
 - Širenje svemira
 - Količina lakih elemenata (H, He, Li) u svemiru
 - Kozmičko pozadinsko zračenje



Big Bang & fizika elementarne čestice



Planckove vrijeme i
duljina

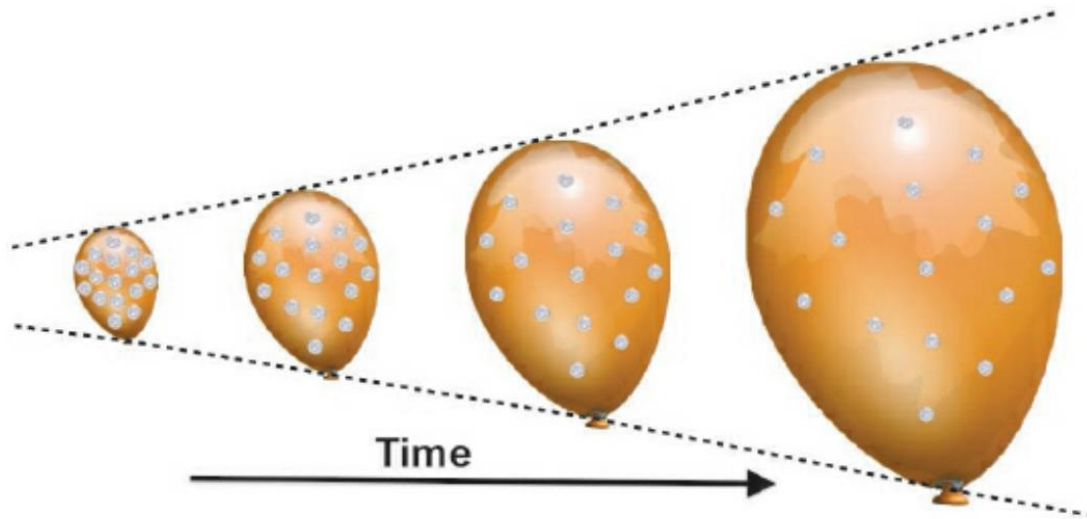
$$t_p = 10^{-43} \text{ s}$$

$$l_p = 10^{-35} \text{ m}$$

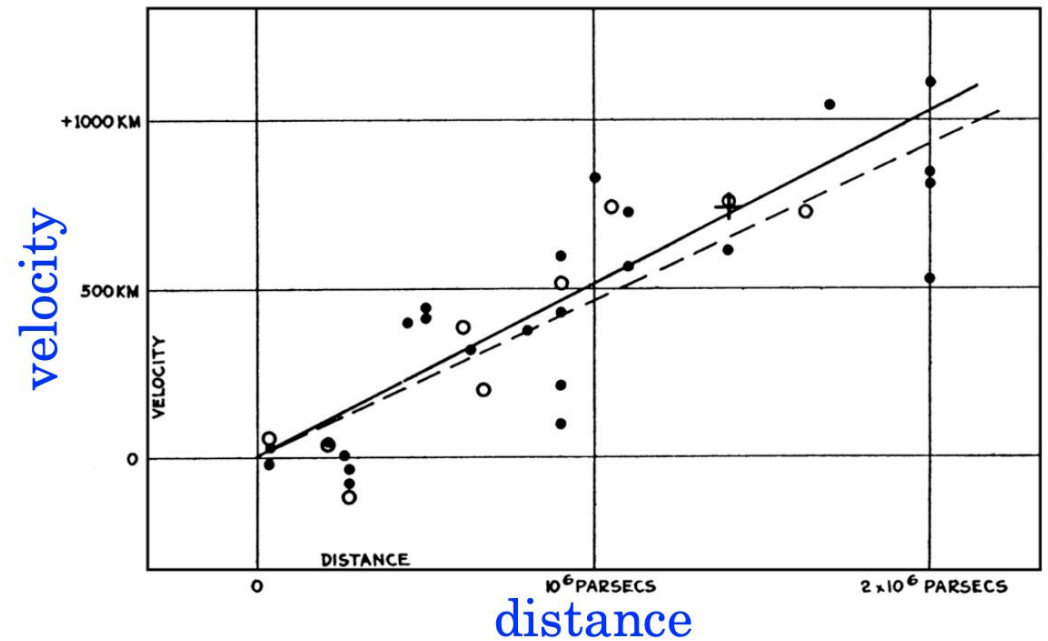
Širenje svemir - Hubble zakob

Hubbleov zakon: $v = Hd$

Starost svemira: $\sim 1/H$



The original Hubble diagram (1929)



Kako izmjeriti H: izmjeriti brzinu udaljavanja galaksija i udaljenost galaksija

- Udaljenost teže
- Brzinu lakše

Brzina – pomak ka crvenom (z)

- Zbog širenja svemira valna duljina se povećava:

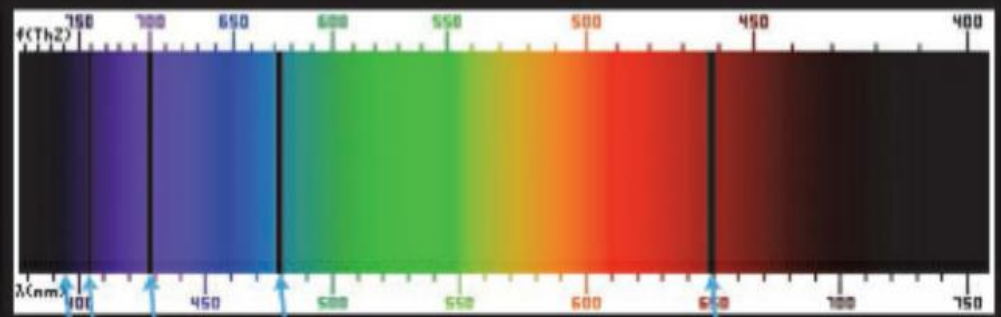
$$\Delta\lambda = \lambda_{\text{opaženi}} - \lambda_{\text{emitirani}}$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1$$

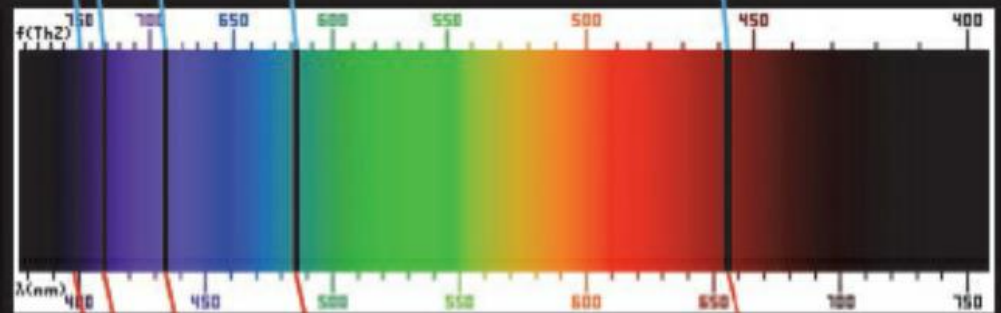
$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}$$

- Treba razumjeti atomsku fiziku - spektralne linije

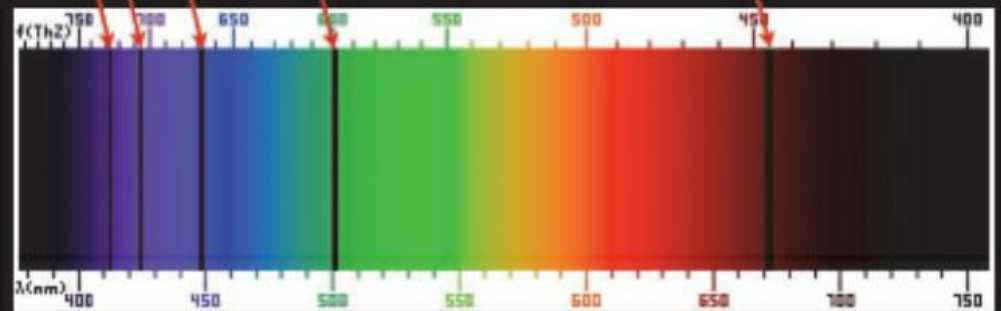
Hydrogen absorption (blueshifted)



Hydrogen absorption (rest frame)



Hydrogen absorption (redshifted)

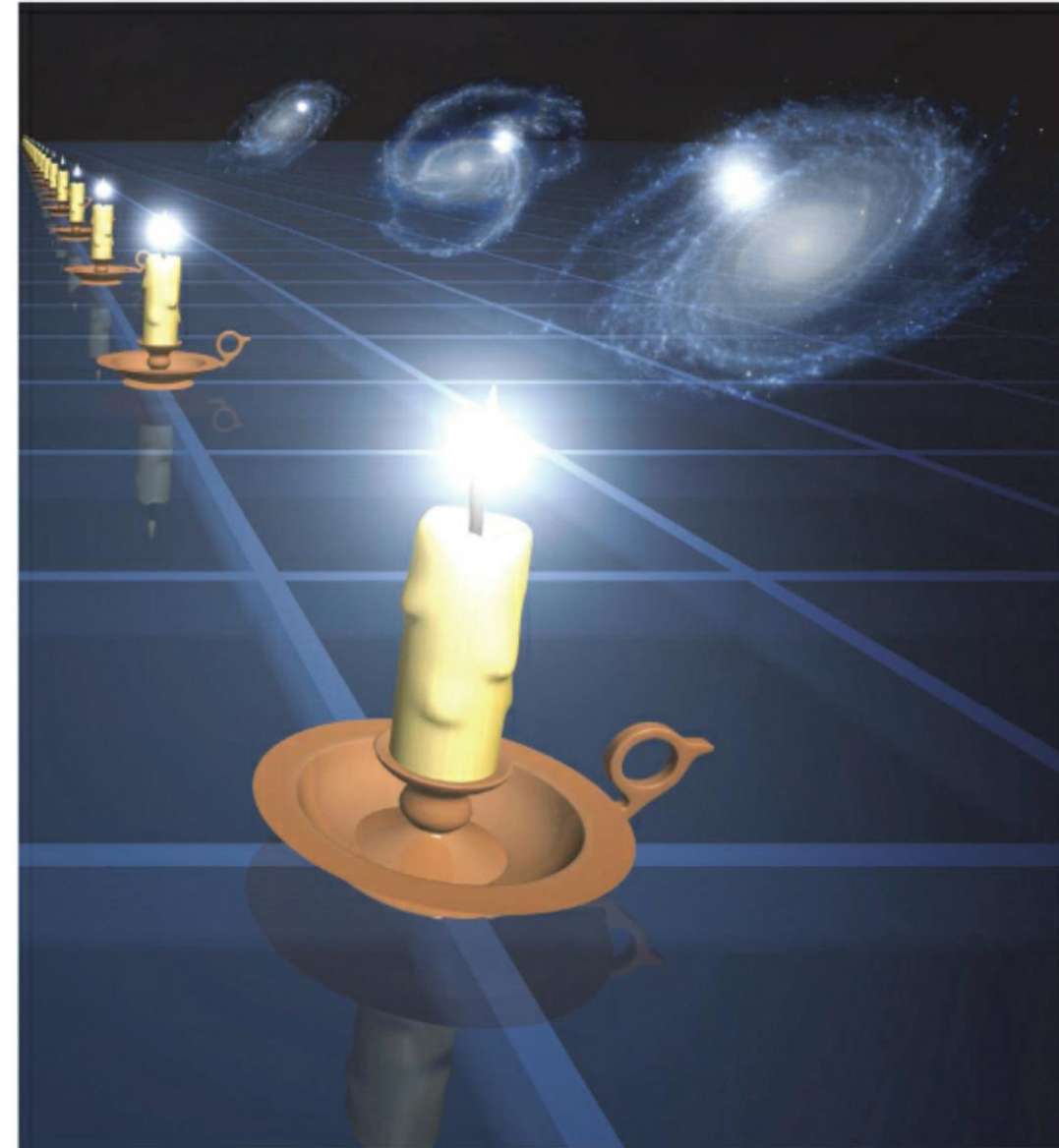


Mjerenje kozmičkih udaljenosti - standardne svijeće

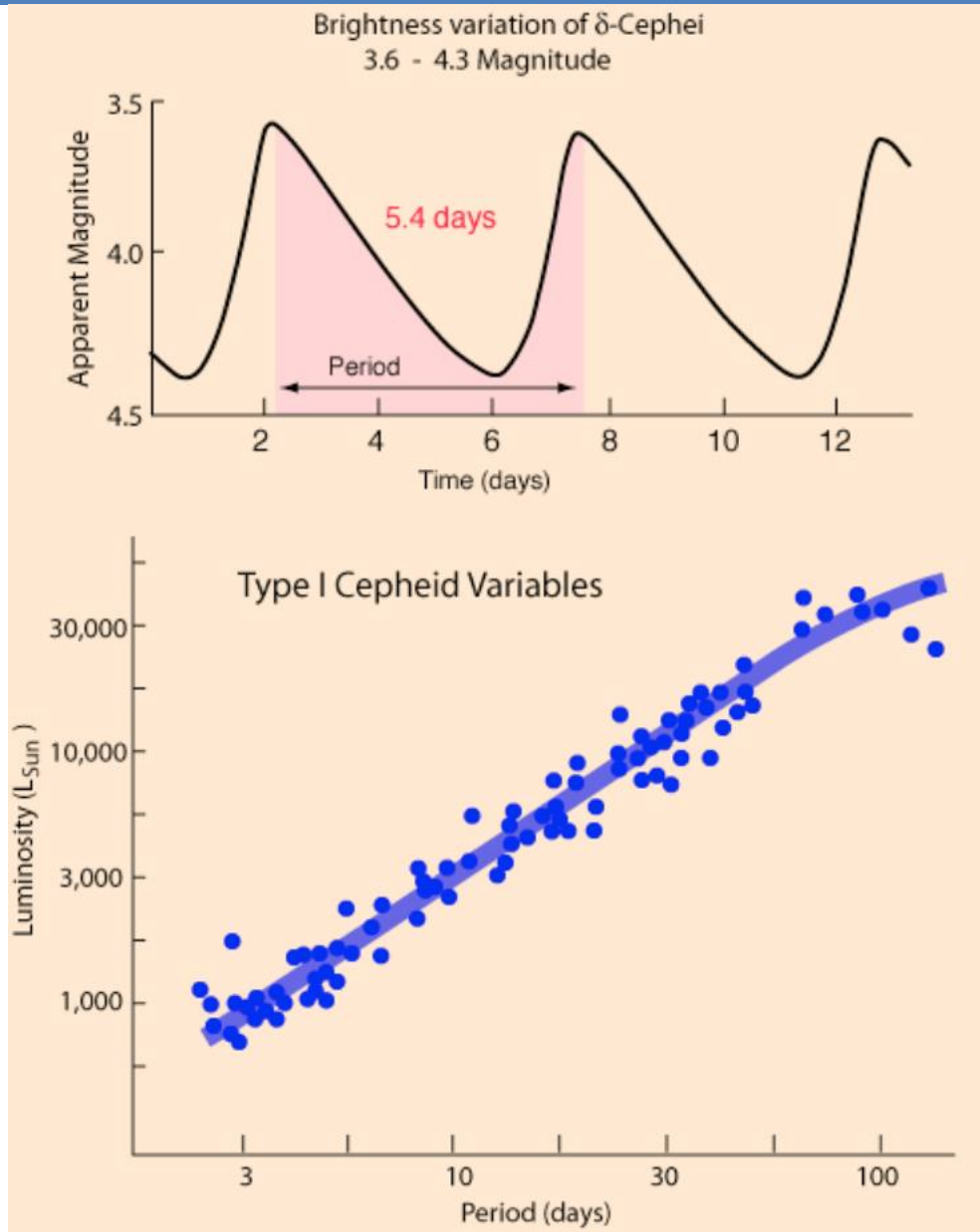
- Standardna svijeća – objekt čiji je intrinzični sjaj (L) poznat (?)
- Izmjeriti prividni sjaj (f) – opada s kvadratom udaljenosti

$$f = \frac{L}{4\pi d^2}$$

- Iz poznatog L izmjerenog f lako se odredi udaljenost
- **Kako prepoznati standardne svijeće!?**



Kozmičke udaljenosti – Cepheide



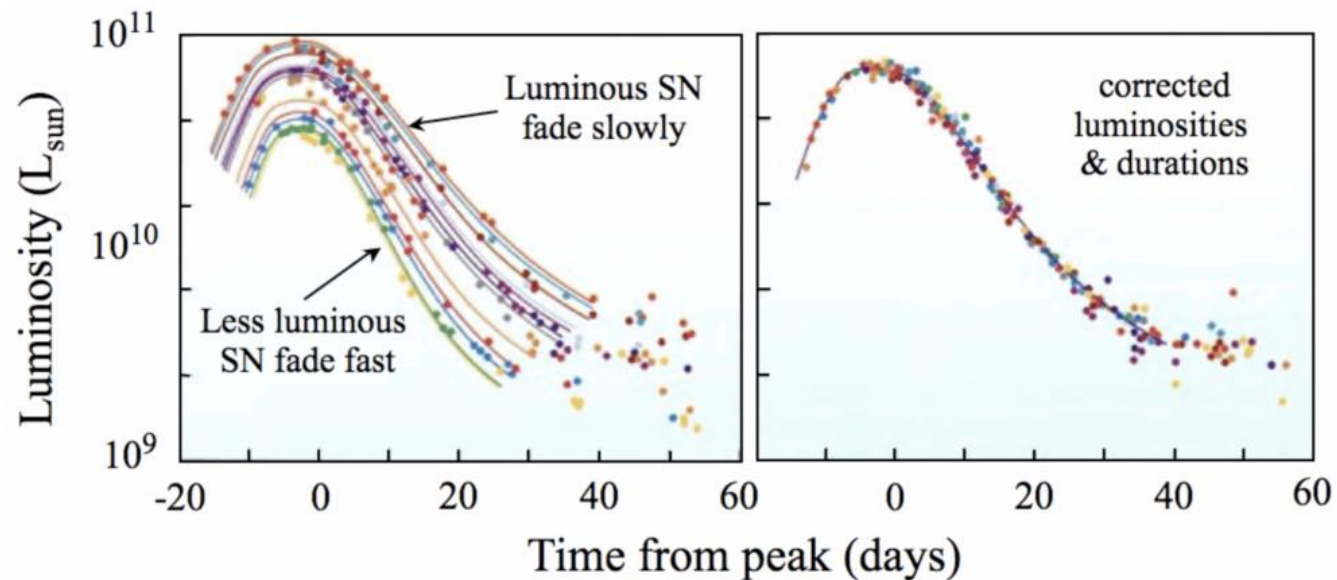
- Promjenljive zvijezde Cepheide kao standardne svijeće
- Opažanja: period pulsiranja Cepheida proporcionalan je intrinzičnom sjaju (L),
- Izmeriti period \rightarrow (L)
- Izmeri prividni sjaj (f)
- Udaljenost d slijedi:

$$f = \frac{L}{4\pi d^2}$$

Henrietta Swan Leavitt (1908)

Standardne svijeće - SNIa

- Eksplozija supernove tipa Ia
- Nekoliko milijardi puta sjanije od sunca
- Fizikalni procesi eksplozije su dobri poznati -> intrinzični sjaj (L) dobro poznat
- Opaženi sjaj (f) -> udaljenost (d)
- Pomak ka crvenom (z) -> brzinu udaljavanja (v)
- Hubbleova konstanta: $H=v/d$



Standardne svijeće - pregled

Standard Candles

THE COSMIC DISTANCE SCALE is a tough nut to crack, requiring a layer of different techniques. Parallax works well over relatively short distances; Cepheid variable stars extend our reach out to nearby galaxies. Planetary nebulae, supernovae, and quasars take us to the edge of infinity.

Gravitationally Lensed Quasars ➤

Sunyaev-Zel'dovich Effect ➤

Type 1a Supernovae ➤

VLBI: Maser Proper Motion

VLBI: Radio Jet Proper Motion

Tully-Fisher Relation

Planetary Nebulae

Cepheid Variables and TRGB

Parallax

Light-years

1 10 100 1000 10⁴ 10⁵ 10⁶ 10⁷ 10⁸ 10⁹ 10¹⁰



Proxima Centauri

Hyades Star Cluster

Magellanic Clouds

Andromeda Galaxy

Virgo Cluster

Coma Cluster

Hydra Cluster

Znamo kako mjeriti
Hubble-ovu konstantu

A o čemu ovisi H =?

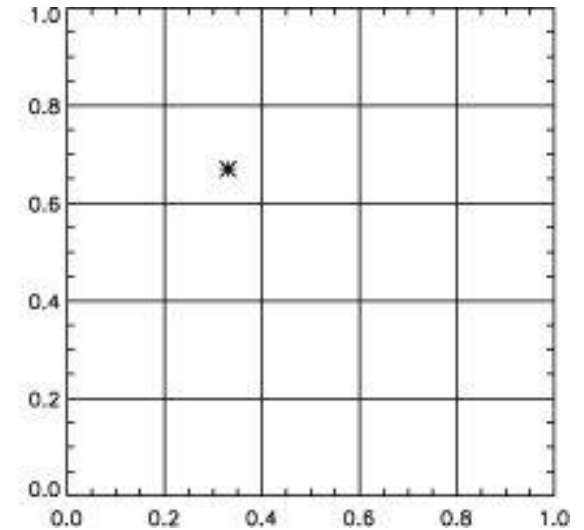
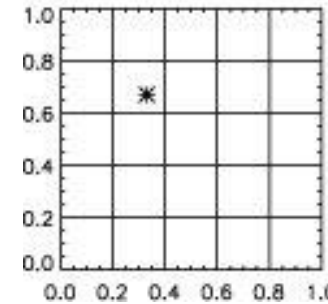
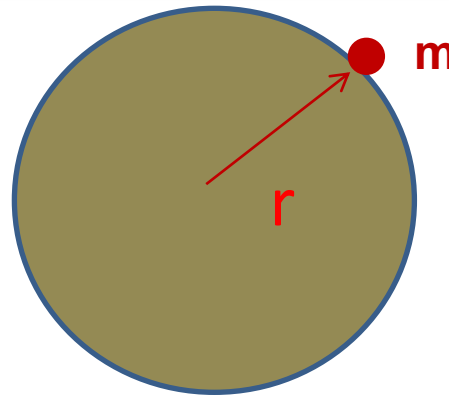
Friedmann equation (1922)

- Fridmann-ova jednađba opisuje širenje svemira:

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \dot{r}^2 - \frac{4\pi}{3} G \rho r^2 m$$

$$r = a(t) x \quad k = -\frac{2E}{mc^2 x^2}$$

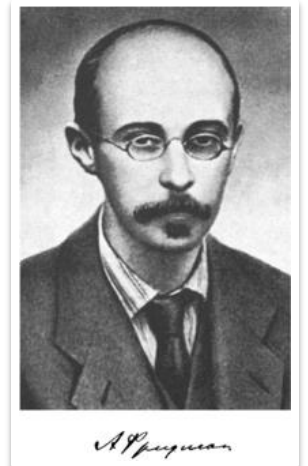
Homogeni i uniformni medij



- r – fizikalna udaljenost; $r=a(t)x$
- x – ”comoving” koordinate (fiksne $dx/dt=x=0$)
- $a(t)$ –cosmic scale factor
- k - konstanta za dani svemir
- ρ - gustoća svemira

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{a^2}$$

Friedmann equation



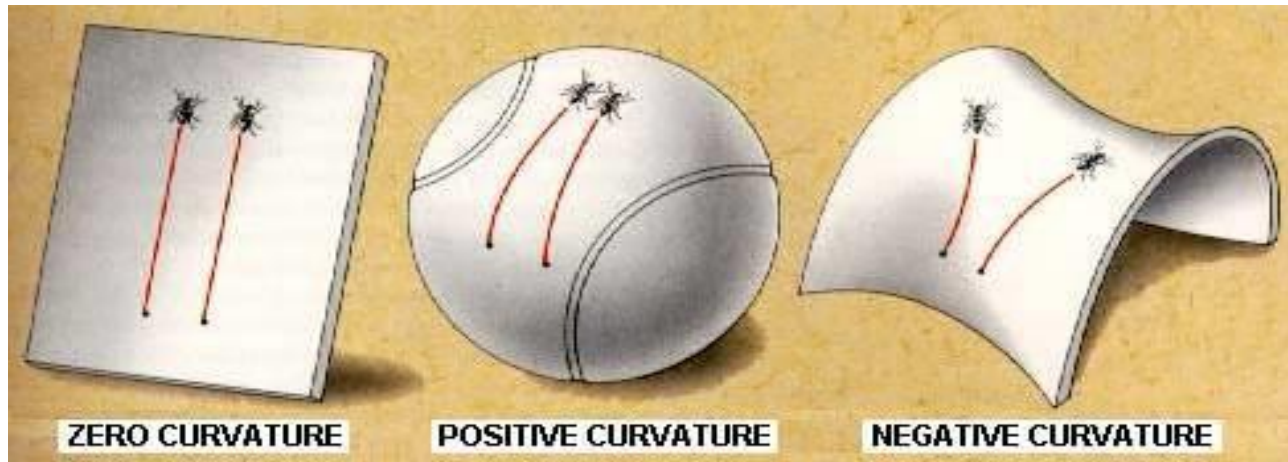
Geometrija svemira

- Gravitacija je posljedica geometrije svemira – zakrivljenosti prostor-vremena
- Zakrivljenost prostorvremena je definirana gustoćom materije (tvar + energija)
- k – povezan s energijom, k - mjeri zakrivljenost prostor vremena.

$k=0$

$k=1$

$k=-1$



curvature	geometry	angles of triangle	circumference of circle	type of Universe
$k > 0$	spherical	$> 180^\circ$	$c < 2\pi r$	Closed
$k = 0$	flat	180°	$c = 2\pi r$	Flat
$k < 0$	hyperbolic	$< 180^\circ$	$c > 2\pi r$	Open

Homogenost svemira znači i da je zakrivljenost u bilo kojoj točki ista. Samo tri prostora mogu imati homogenu zakrivljenost. (Parabola i elipsa nemaju svugdje istu zakrivljenost)

Hubble-ova konstanta & geometrija svemira

- Geometrija ovisi o sastavu/gustoći svemira

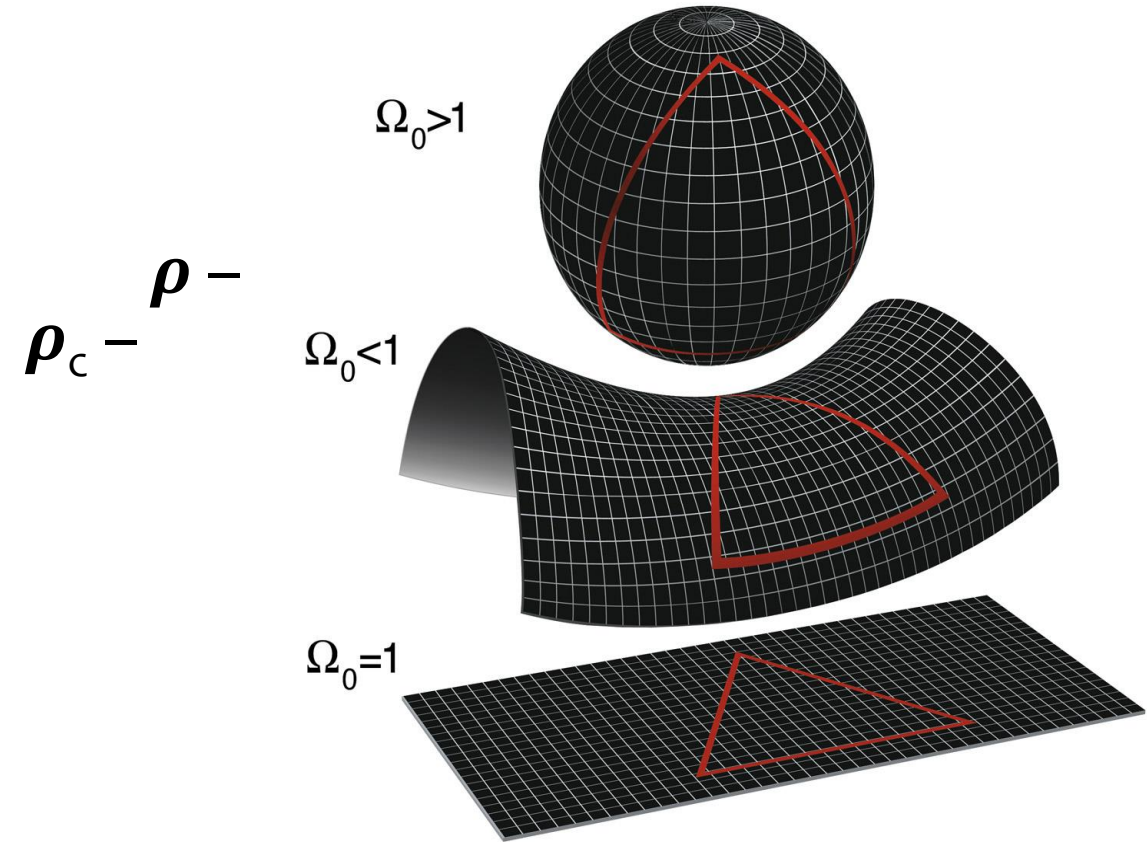
- Ravan svemir (k=0): $\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G}$

- Ω - parametar gustoće, $\Omega = \rho/\rho_c$
opažena gustoća,
kritična gustoća

- $\Omega = \Omega_{\text{matter}} + \Omega_{\text{radiation}} + \Omega_{\Lambda}$

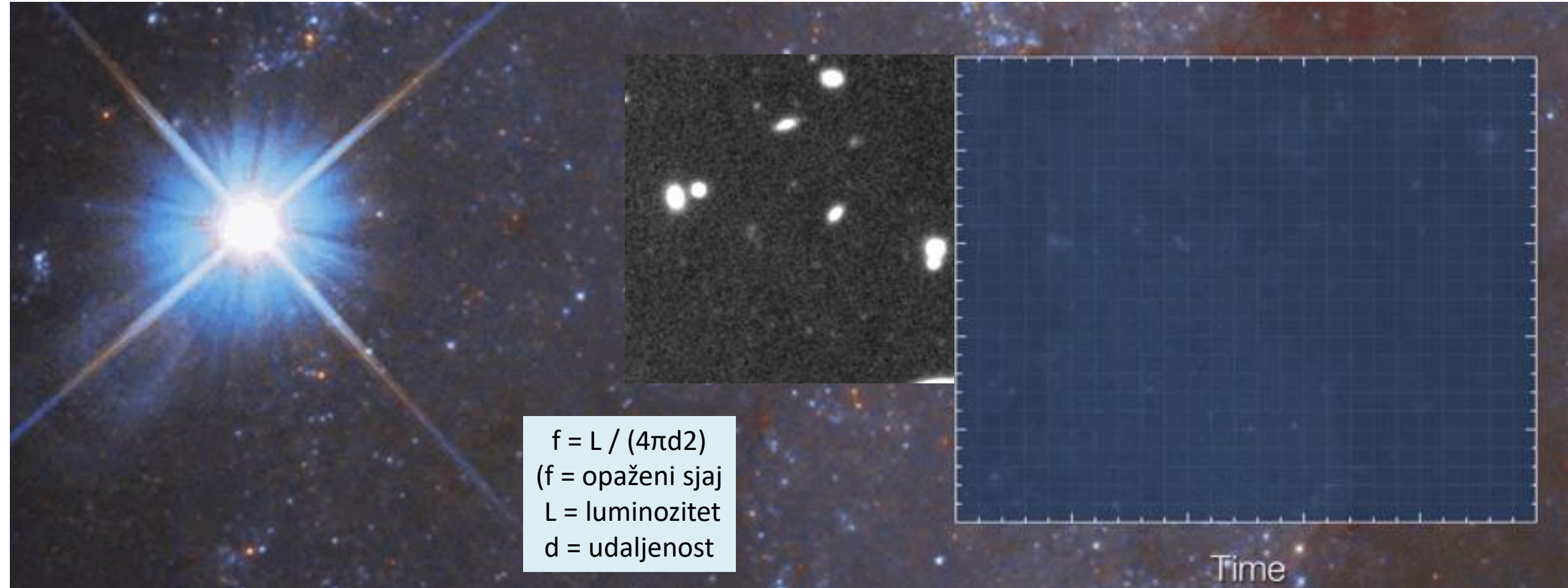
- $H_0 = 73.04 \pm 1.04$ km/s/Mpc (2022)

- $\rho_c \sim 9 \times 10^{-27}$ kg/m³ ≈ 5 protona/m³ ≈ 1 galaksija /Mpc³

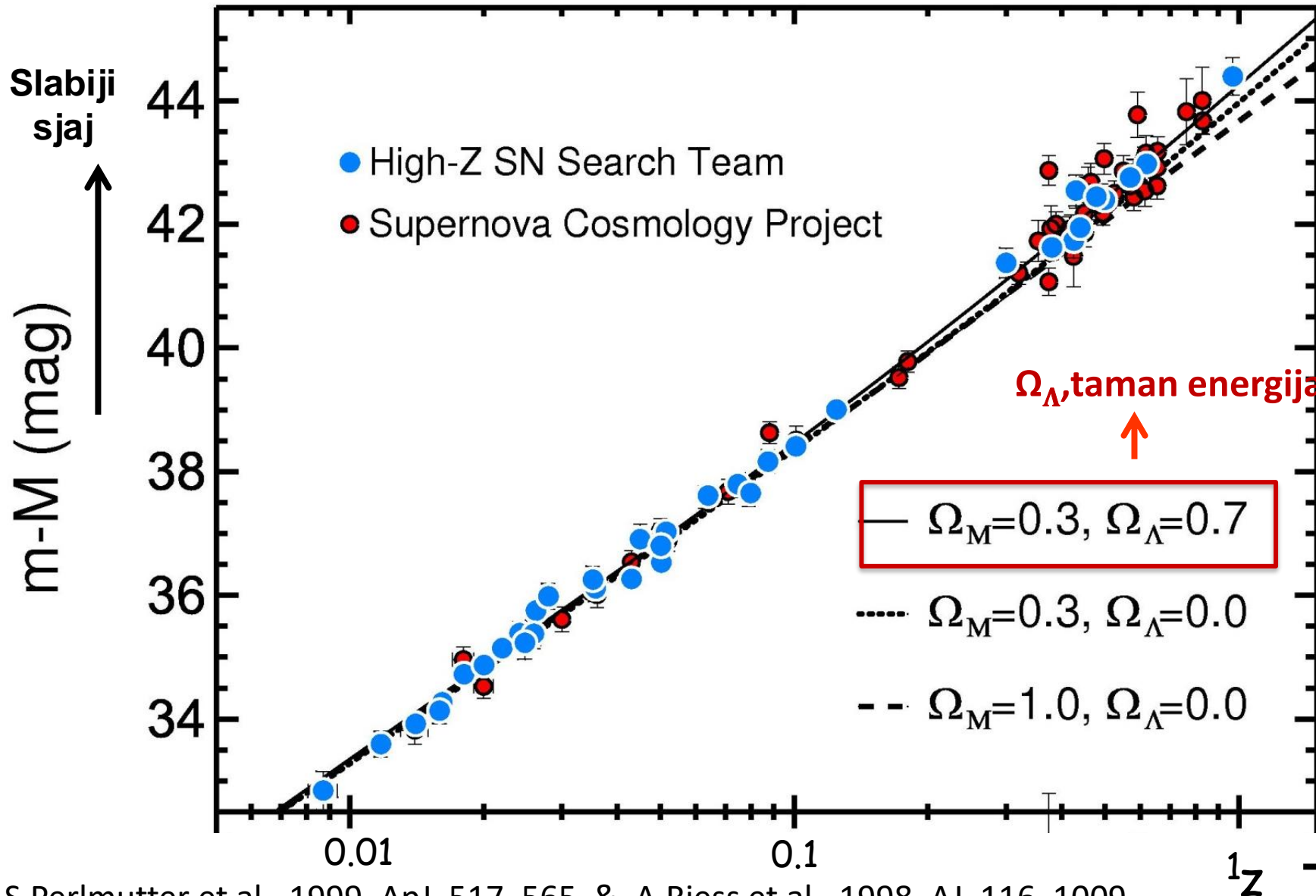


Standardna svijeće - SN-Ia

- d - pouzdano (?!) 10^{10} l.y.



1998 – SN-Ia - ubrzano širenje svemira



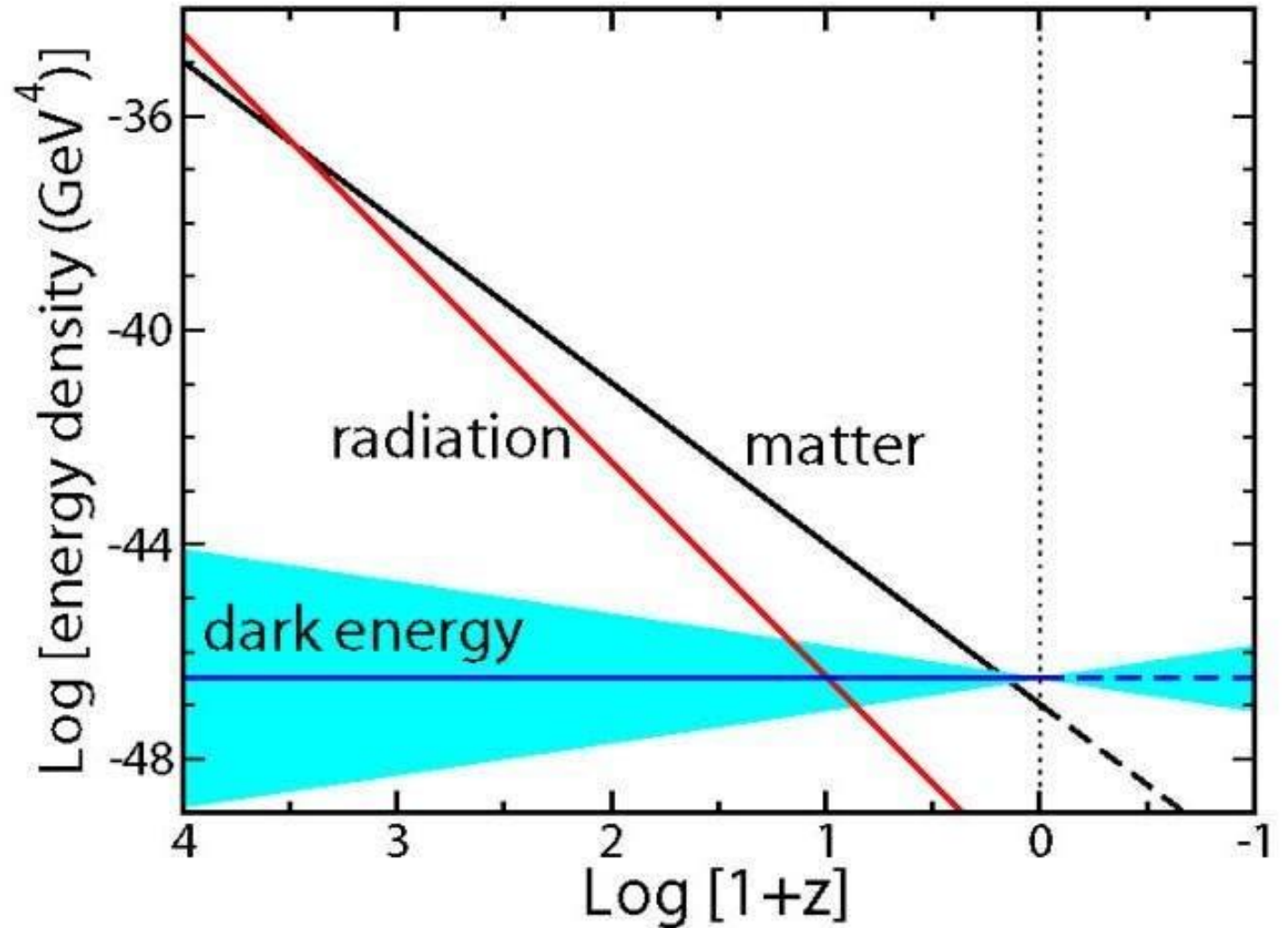
Članovi oba projekta očekivali su da što je supernova udaljenija (što je dalje u vremenu), to će izgledati svjetlija (bliže) u odnosu na svoj crveni pomak - pokazatelj da se širenje usporava. Umjesto toga, oba su tima otkrila suprotno.

Otkrili su da su udaljene supernove bile tamnije od očekivanog. Ovo opažanje moglo bi se objasniti samo ako se širenje svemira ubrzava, a ne usporava kako se prije mislilo.

samo materija

Gustoće energije sastavnica svemira

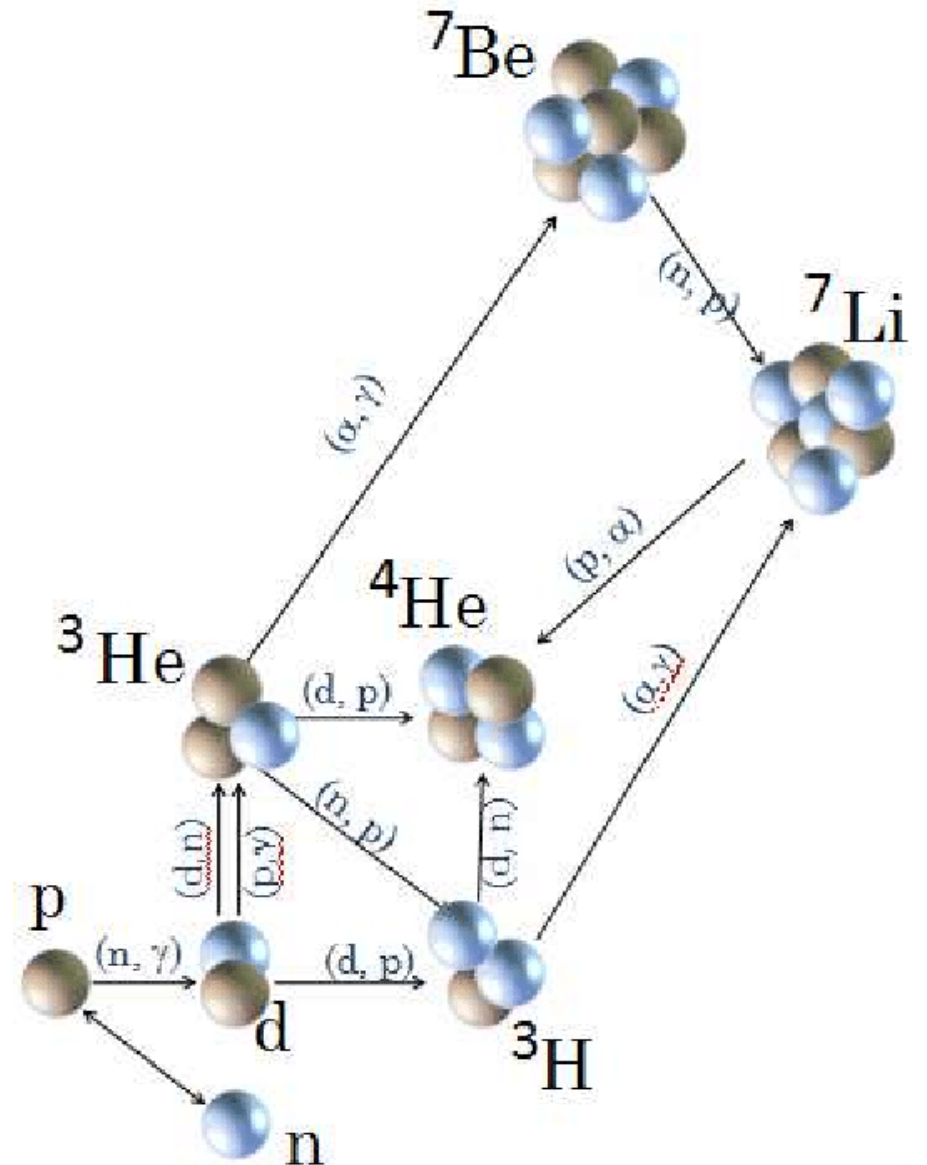
- Kako se svemir širi smanjuje se gustoće energije zračenja (brže od materije (?))
- Na početku dominira zračenje
- Materija
- Sada tamna energija



Big Bang Nukleosinteza

BBN - Big Bang Nukleosinteza (1 sekunde – 20 minuta)

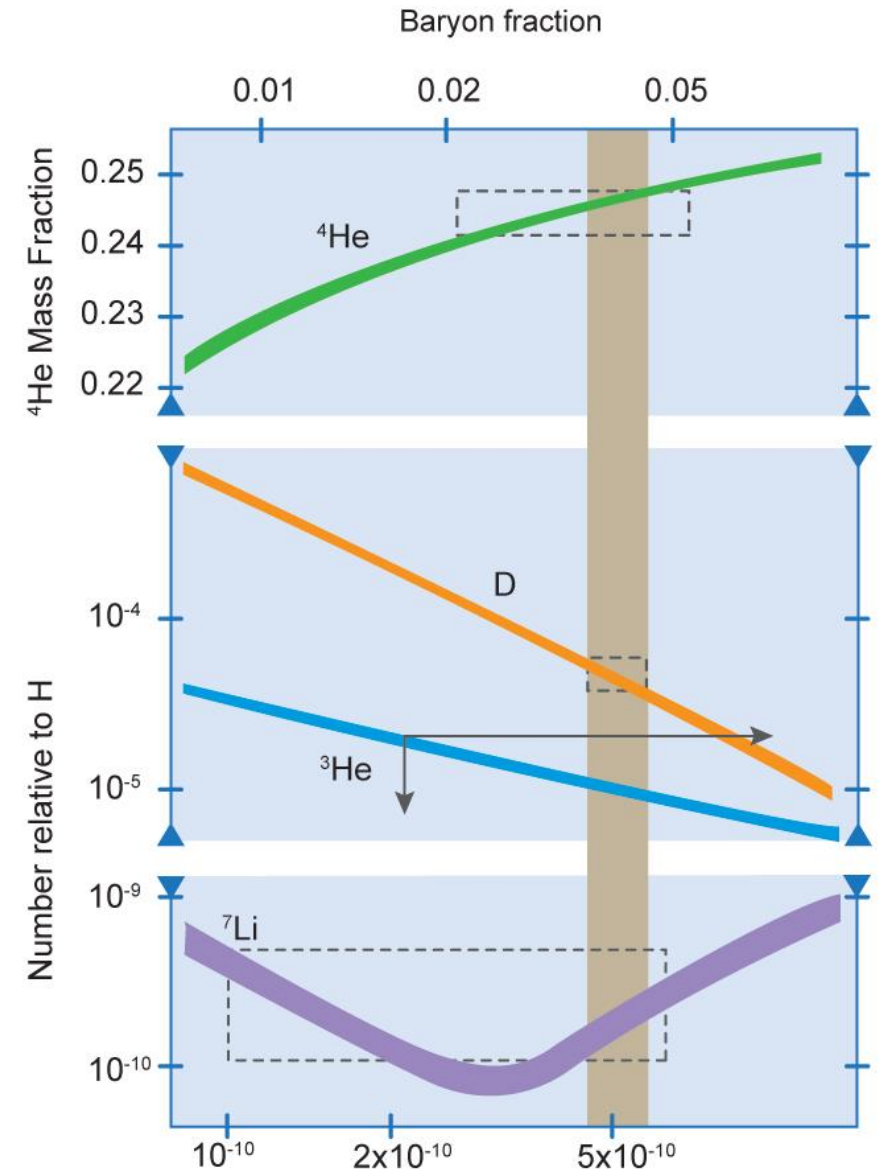
- Prvo se formira jezgra deutrija ^2H (pn)
- Odvija se i fuzija deuterija u He, ali fotoni (gama zrake) razbijaju helij (helij se proizvodi i disocira)
- Kako se svemir širi opada energija foton.
- Fuzija deuterija stvara He kojeg danas opažamo kad temperature padne toliko da fotoni nemaju dovoljno energije da disociraju He (svemir star 1 cca. Minuta)
- Račun pokazuje @ $t \approx 1$ min omjer $p/n \approx 7$
- $1/7$ je kao $2/14$; Ima 12 jezgri vodika (p) na jednu jezgru He.
- Omjer mase H prema masi He je $12/4$ odnosno 75 % (masa - p) 25 % (4He)
- BBN daje jednoznačnu predikciju kemijskog sastava ranog svemira koja je potvrđena opažanjem.



Opažanja potvrđuju predikcije BBN

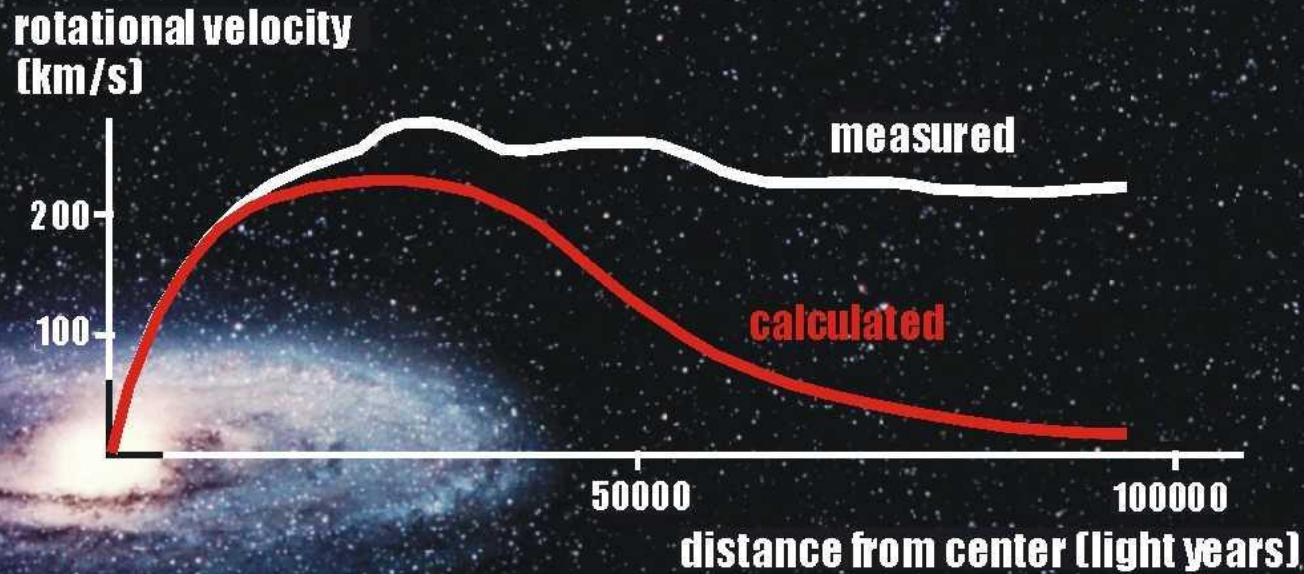
- Različita opažanja međuzvezdanog medija i izvan galaktičkih oblaka plina, ... potvrđuju predviđanja da je otprilike 75% mase vidljivog svemira u formi vodik, a oko 25% helij po masi s izvanrednom točnošću.
- Big Bang nukleosinteza potvrđuje teorije o porijeklu elemenata u svemiru, pružajući osnovu za daljnje istraživanje procesa stvaranja elemenata u zvijezdama, supernovama i drugim kozmičkim događajima

[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_Cosmology/Big_Ideas_in_Cosmology_\(Coble_et_al.\)/16%3A_The_Early_Universe/16.01%3A_The_Formation_of_the_Lightest_Elements](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Astronomy_Cosmology/Big_Ideas_in_Cosmology_(Coble_et_al.)/16%3A_The_Early_Universe/16.01%3A_The_Formation_of_the_Lightest_Elements)

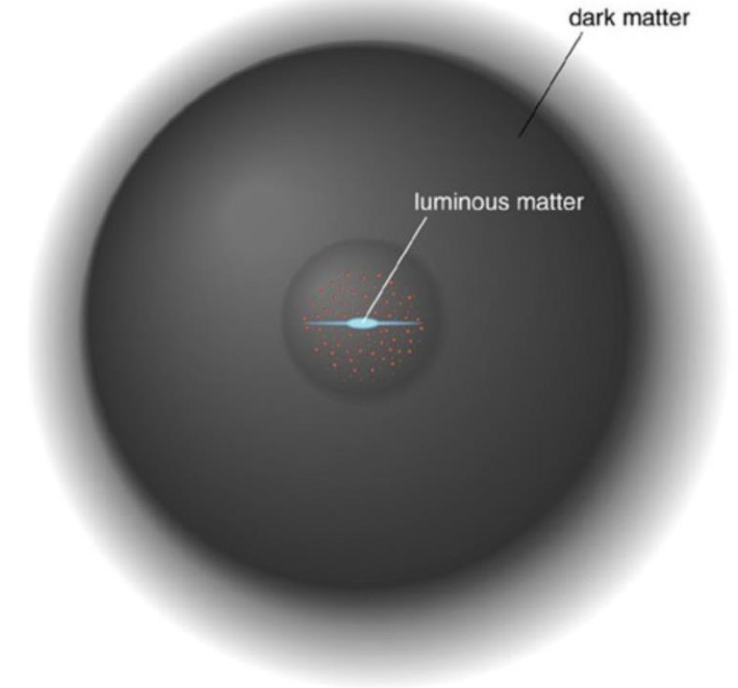


η -omjer između broja bariona (n_b) i fotona

Astronomska opažanja - tamna materija



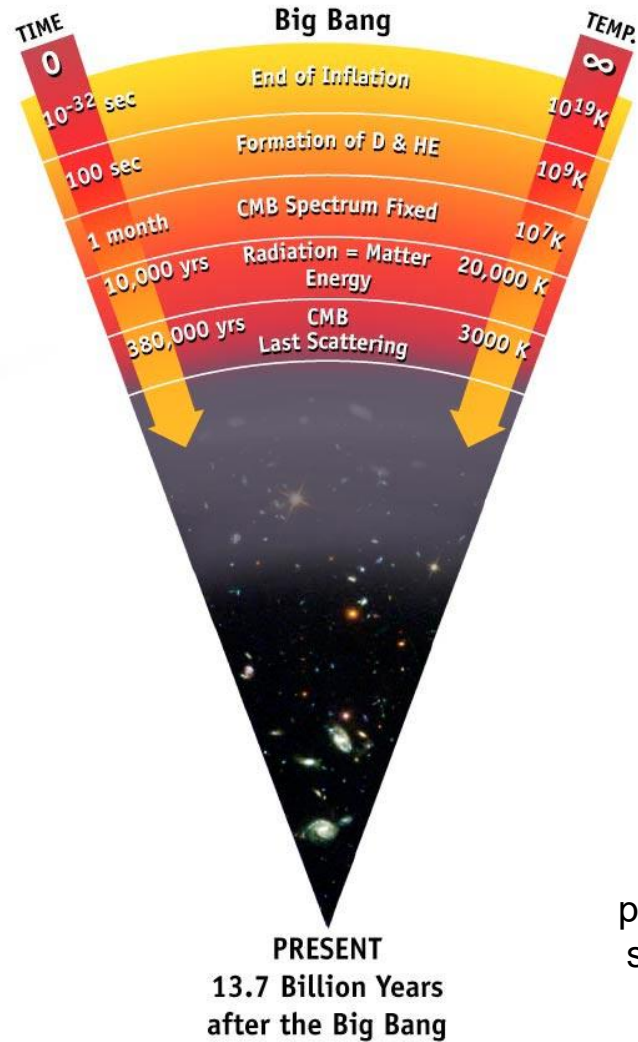
$$v^2 = \frac{GM_{\text{vidljiva}}}{r}$$



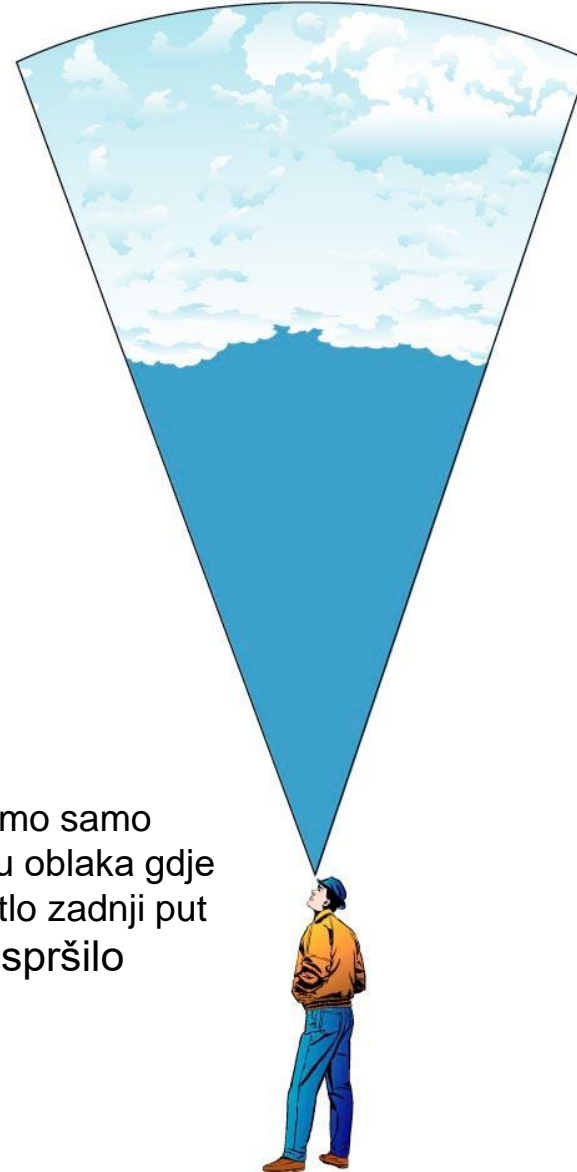
Rotacijska krivulja galaksije; prema Keplerovom zakonu, brzina rotacije trebala bi se smanjivati s udaljenošću od vidljivog diska (crvena krivulja), ali promatranje (bijela krivulja) pokazuje gotovo konstantnu brzinu do vrlo velikih radijusa. Fritz Zwicky (1930), Vera Rubin (1960 i 70-tih godina).

CMB

Kozmičko mikrovalno
pozadinsko zračenje



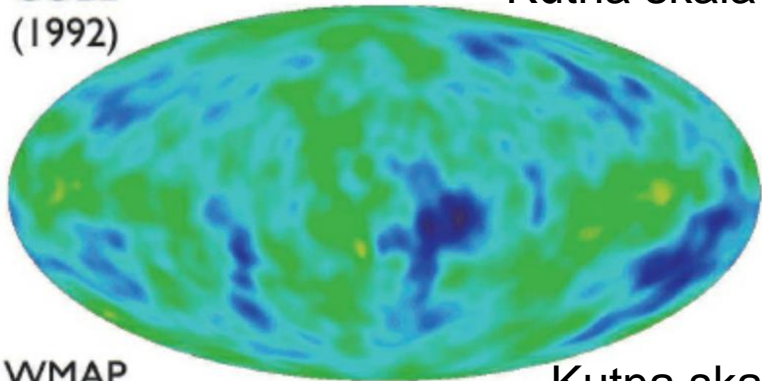
CMB sfera zadnjeg raspršenja
analogna je svjetlosti koja
prolazi kroz oblake



Vidimo samo
površinu oblaka gdje
se svjetlo zadnji put
raspršilo

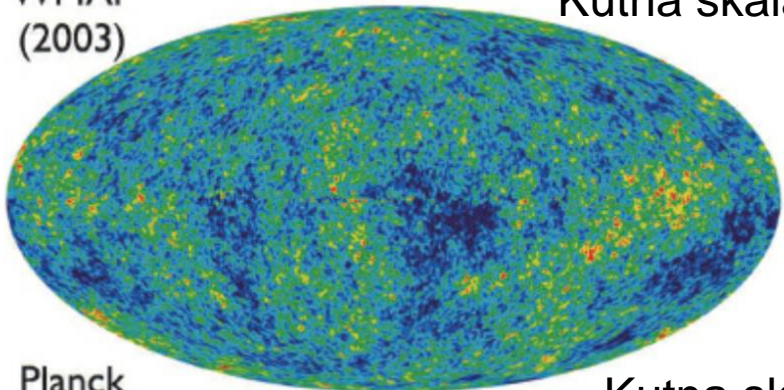
COBE
(1992)

Kutna skala 7°



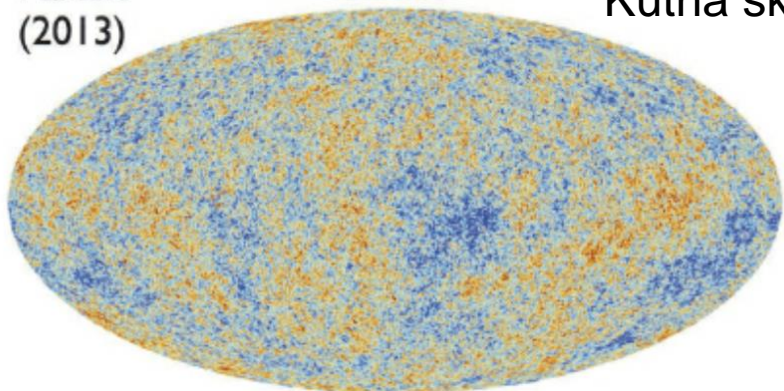
WMAP
(2003)

Kutna skala 0.3°



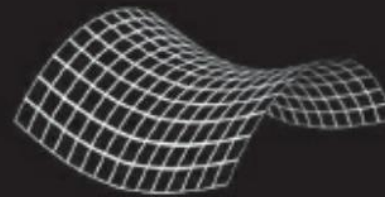
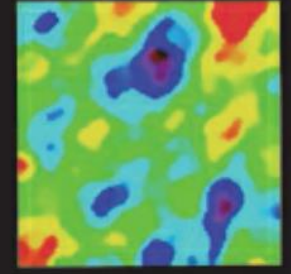
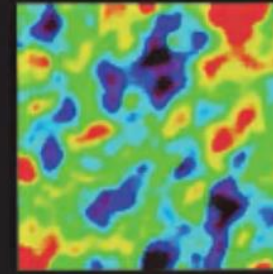
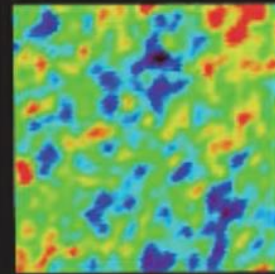
Planck
(2013)

Kutna skala 0.08°

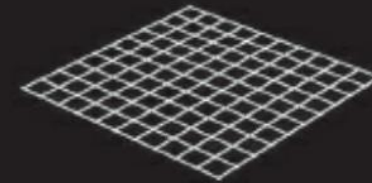


$\langle T \rangle = 2.726 \pm 10^{-5} \text{ K}$

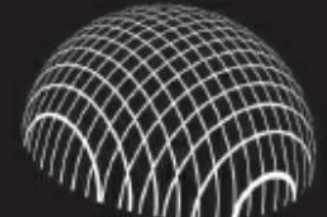
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT

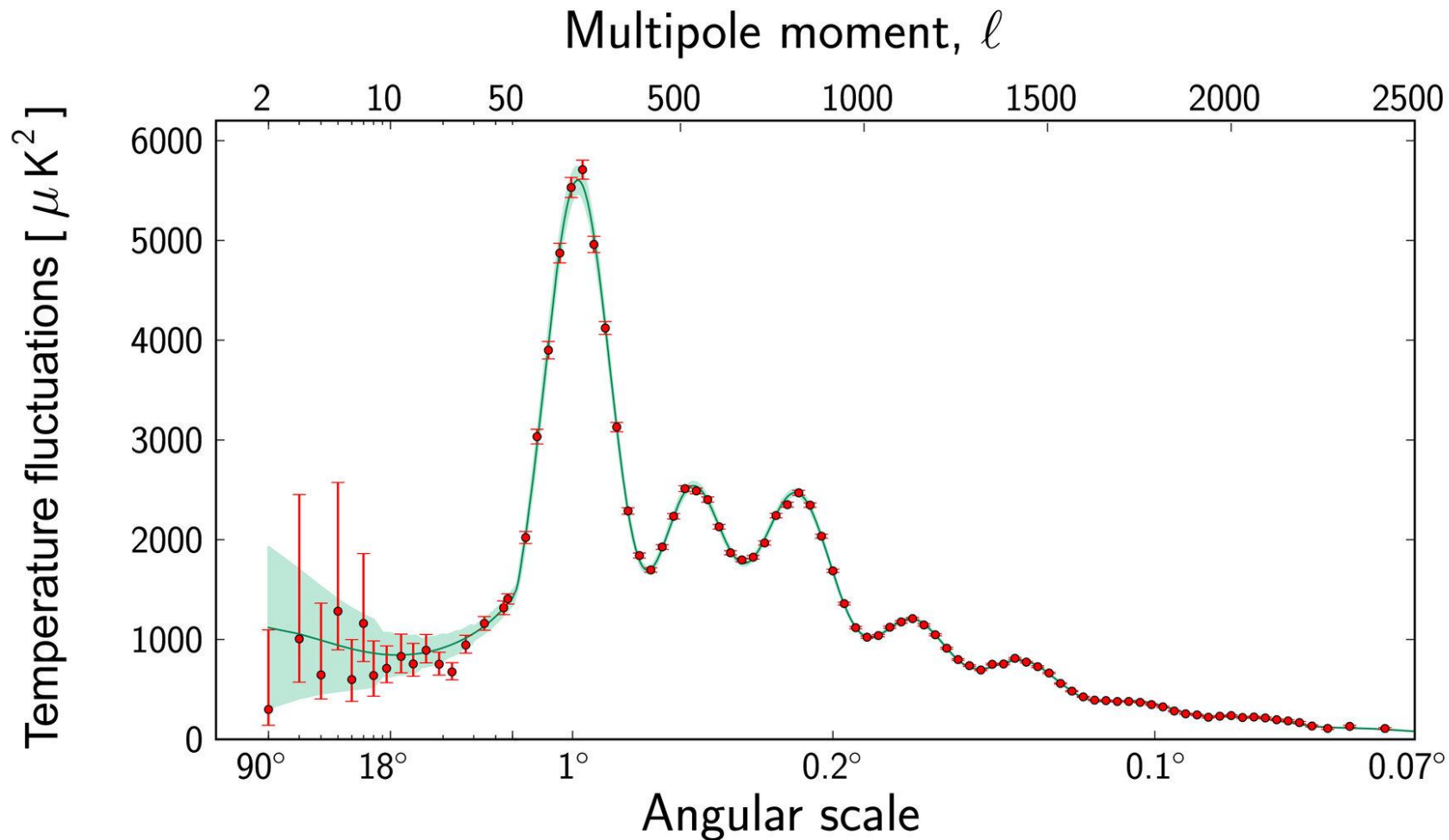


CLOSED

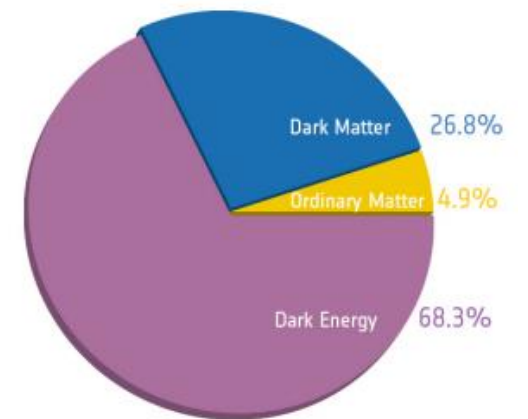
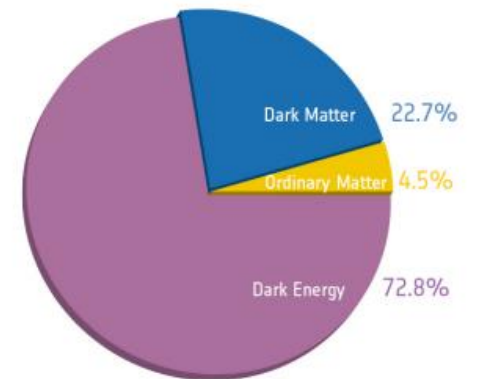
Različita prostorna zakrivljenost ima jedinstvenu raspodjelu materije (uključujući običnu i tamnu materiju) na sferi posljednjeg raspršenja.

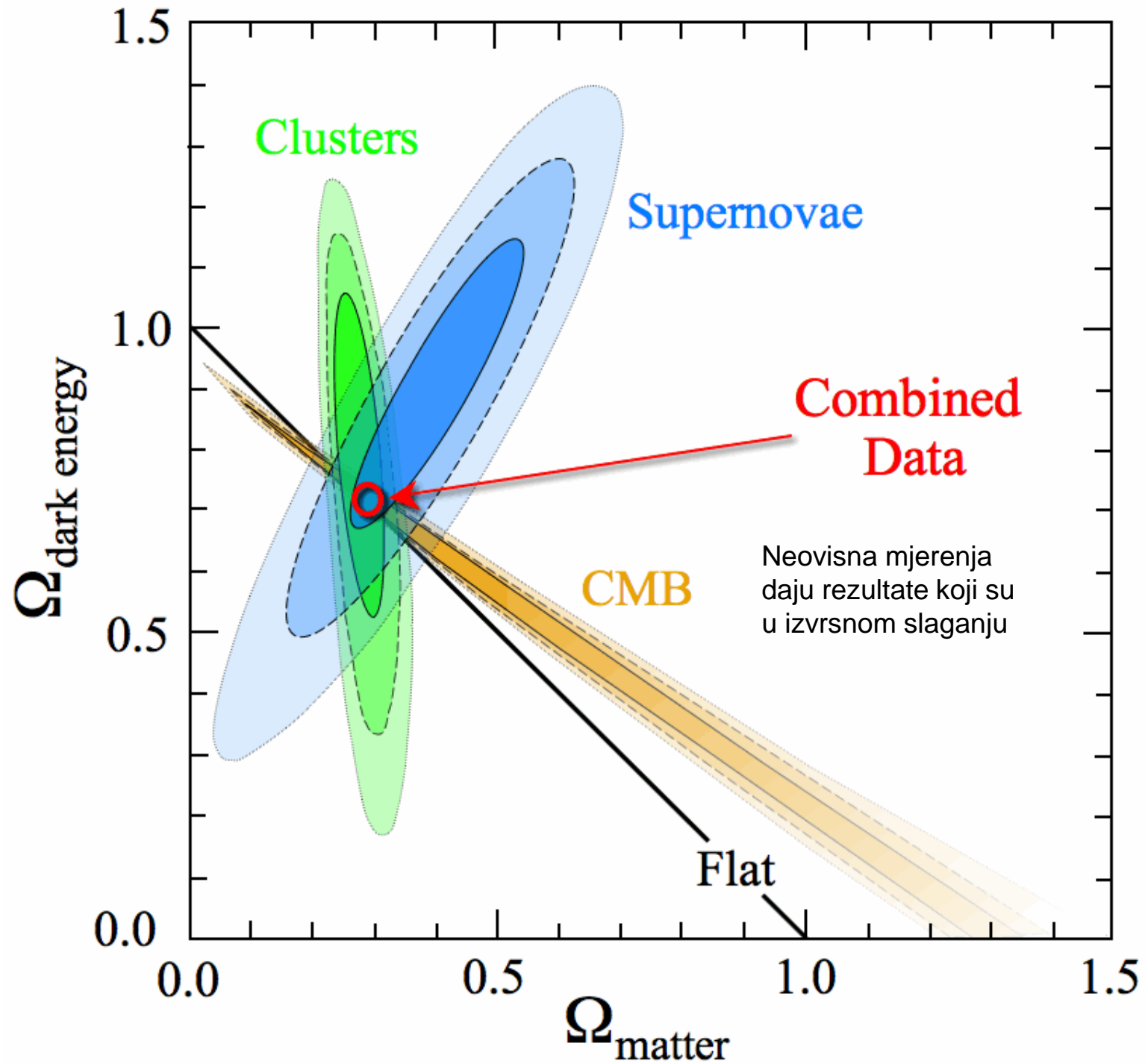
Opažanja ukazuju da je geometrija svemira ravan s preciznošću boljom od 0.04%

CMB analiza

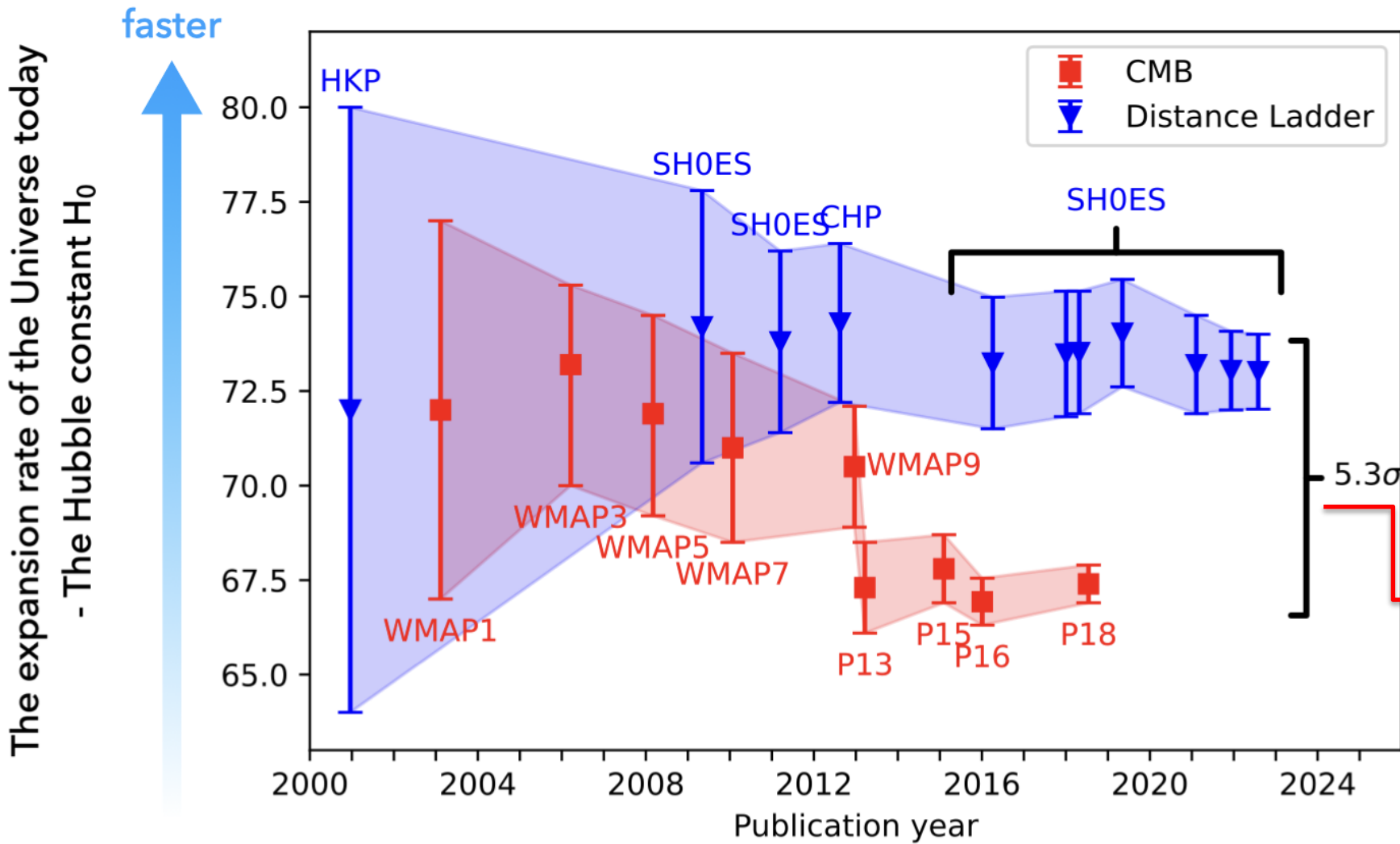


Svemir iznimno ravan – opažena gustoća svemira (5 protona/m³)





Hubbleova napetost



Evolucija Hubbleove napetosti (određivanje Hubbleove konstante) u posljednje 23 godine korištenjem izravnih mjerenja **ljestvica udaljenosti u lokalnom svemiru (plavo)** i modela temeljenih na kozmičkoj mikrovalnoj pozadini ranog svemira (**CMB (crveno)**). Napetost je jaz između dva mjerenja koji raste i sada je statistički značajan.

Šansa 1 na 3.5 milijuna da je ovo neslaganje samo Statistička slučajnost

Zaključak

- Kozmologija je postala precizna znanstvena disciplina za opisivanje evolucije svemira koji se širi (sigurno znamo da je bio manji u prošlosti)
- Standardni kozmološki model: **Λ CDM**
- Tamna energija čini da se širenje svemira ubrzava – ne razumijemo je dovoljno
- Tamna materija, brojne teorije, intenzivna eksperimentalna potraga za tamnom materiji: LHC (SUSY kandidat skoro isključen), posebno dizajniranim eksperimentima i astrofizičkim opažanjima
- Hubbleova napetost, neslaganje u mjerenjima H_0 s dvije provjerene metode možda ukazuje na nova velika otkrića

**THANK
YOU**

